

# **Sistema de *shearography* para inspeção não destrutiva**

*Francisco Braga de Oliveira Almeida e Silva*

## **Dissertação de Mestrado**

Orientador na FEUP: Prof Doutor Mário Augusto Pires Vaz

Coorientador na FEUP: Doutor Jaime Miranda Monteiro



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**  
**Projeto e Construção Mecânica**

Junho de 2017









## Resumo

As técnicas de inspeção não destrutiva são atualmente ferramentas essenciais à engenharia. Nos mais diversos setores da indústria, quer seja na mecânica, eletrônica, aviação ou construção, entre outros, existe grande necessidade de técnicas que possam ser usadas como apoio ao projeto, produção e manutenção de estruturas ou componentes. Os materiais compósitos de fibra representam já e cada vez mais uma opção viável alternativa em relação aos materiais tradicionais metálicos, como o aço ou o alumínio, por exemplo. Neste contexto as técnicas óticas merecem destaque na inspeção de compósitos.

Este trabalho focou-se na utilização de uma técnica conhecida como *shearography*, que é uma técnica interferométrica, que permite conhecer diretamente um gradiente de deformação de uma peça após esta sofrer um carregamento. Esta capacidade confere à técnica fortes capacidades de deteção de defeitos, sendo ideal na deteção de defeitos em materiais compósitos. Ao longo da dissertação foram explanados os princípios físicos fundamentais para a aplicação da técnica, tais como a teoria de propagação de ondas os princípios de interferência e coerência, o conceito de speckle, etc.

A aplicação da *shearography* requer a utilização de um interferómetro que permita manipular a luz, assim como uma fonte de radiação coerente que permita a ocorrência de interferência. Foi apresentado o projeto de um interferómetro, com a respetiva seleção de componentes óticos e fabrico dos elementos de suporte. A produção dos elementos estruturais do interferómetro foi feita com recurso a novos métodos aditivos de fabrico, vulgo impressão 3D.

O interferómetro foi usado para ensaiar duas peças de diferentes geometrias e estudado o efeito que diferentes parâmetros tem na deteção do defeito, como o tamanho de *shear* e abertura do diafragma. Para os ensaios foi usado o interferómetro, um laser de HeNe e uma lâmpada de halogénio. Os ensaios ocorreram no laboratório de ótica e mecânica experimental da FEUP/INEGI.

As peças ensaiadas tinham defeitos de localização e magnitude conhecidas, tendo este sido induzidos nas peças por impacto numa máquina tipo *drop tower*. As peças ensaiadas foram uma placa plana retangular de fibra de carbono e resina e uma peça, também de fibra de carbono e resina, de geometria complexa com formas curvas, furos e nervuras cedida pela Caetano Aeronautic. Esta peça foi impactada com diferentes energias, que originaram defeitos de diferentes magnitudes de dano.

Foi possível detetar os defeitos, sendo possível perceber-se a magnitude relativa do dano. Tendo em conta que a solução de interferómetro apresentada é um protótipo, com as falhas inerentes de ser um protótipo, os resultados obtidos são satisfatórios e mostram a viabilidade da solução alcançada.



# Índice

1. Introdução .....	1
1.1 Motivação .....	2
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Contribuições deste trabalho .....	3
1.4 Estrutura da Tese .....	4
2. Estado da arte .....	5
2.1 Estado da arte .....	5
2.2 Principais técnicas de NDT .....	7
2.3 Breve história da holografia .....	9
2.4 Normalização e Certificação .....	10
2.5 Exemplos de aplicações da <i>shearography</i> .....	10
2.6 Breve descrição da técnica para medição estática. ....	12
2.7 Métodos de carregamento em medição estática .....	14
2.8 Porquê interferometria .....	14
2.9 Porquê a Shearography .....	15
3. Interferómetro de Michelson .....	17
3.1 O interferómetro de Michelson .....	19
3.2 Medição deslocamento e gradientes no plano e fora do plano, vetor sensibilidade. .	20
3.3 Medição estática e medição dinâmica. ....	22
4. Caracterização da luz .....	23
4.1 A Luz, propagação de ondas .....	23
4.2 Interferência e coerência .....	25
4.3 Propriedades do <i>speckle</i> .....	28
4.4 Caracterização do <i>speckle</i> .....	29
4.5 Correlação de dois campos de <i>speckle</i> .....	30
4.6 Descorrelação do <i>speckle</i> .....	30
4.7 Dimensão do <i>speckle</i> .....	31
4.8 Medição de gradiente de deslocamentos .....	32
4.9 Modulação de fase .....	34
5. Projeto de um sistema <i>shearography</i> . ....	37
5.1 Simulação de seleção de componentes .....	38
5.2 Seleção de material para fabrico dos componentes mecânicos. ....	41
5.3 Projeto 3D dos componentes principais. ....	42
5.4 Funcionamento e montagem do interferómetro .....	46

5.5	Protótipos .....	49
5.6	Dificuldades com o fabrico aditivo dos componentes .....	52
5.7	Considerações finais de capítulo .....	53
6.	Ensaio e resultados .....	55
6.1	Ensaio de NDT numa peça construída na Caetano Aeronautic .....	70
6.2	Considerações finais de capítulo .....	77
7.	Conclusões e trabalhos futuros .....	79
7.1	Conclusão .....	79
7.2	Perspetiva de trabalhos futuros .....	81
	Referências .....	83





## 1. Introdução

O desenvolvimento da ciência e da engenharia geram novas oportunidades e soluções que, por sua vez, criam novos desafios. Exemplo disto é a evolução verificada na engenharia estrutural e de materiais. Os materiais usados em engenharia evoluíram do tradicional ferro e aço ou alumínio entre outros metais para soluções em que se usam polímeros ou compósitos de fibra ou ainda se recorre a soluções híbridas. Estes materiais tem propriedades físicas e mecânicas que os tornam alternativas viáveis em múltiplas aplicações, muitas delas de elevada exigência. Desta forma é indispensável acompanhar a evolução desses materiais com o desenvolvimento de técnicas que possam avaliar o comportamento real em serviço. A mecânica experimental recorre a técnicas que permitem estudar o comportamento de objetos ou estruturas sob a ação de cargas estáticas e dinâmicas. Recorrendo a medições de parâmetros fundamentais como forças, deslocamentos e deformações é possível avaliar o comportamento de estruturas e componentes construídos em diferentes matérias. As técnicas de mecânica experimental podem ser úteis em várias áreas de engenharia, nomeadamente no âmbito da inspeção não destrutiva – NDT (Non destructive testing), permitindo detetar precocemente defeitos que comprometam a segurança.

A mecânica experimental tem atualmente ao seu dispor diversas técnicas com capacidade de utilização em NDT. As técnicas óticas destacam-se pelas suas capacidades de medição global e elevada resolução permitindo realizar medições sem qualquer contacto com os componentes e com uma preparação mínima das superfícies.

Nesta dissertação será estudada e aplicada uma técnica ótica para inspeção não destrutiva com enfoque na inspeção de compósitos laminados. Dentro das técnicas óticas a *shearography* revela-se uma opção indicada para NDT deste tipo de materiais. Esta técnica interferométrica recorre a iluminação com radiação coerente e permite construir sistemas compactos que podem ser utilizados em estaleiro. A divulgação dos sistemas laser e as novas técnicas de fabrico aditivo poderão constituir-se como elementos facilitadores da construção de sistemas de NDT de baixo custo que contribuam para aumentar a segurança na utilização de componentes construídos em materiais compósitos.

Ao longo desta tese serão explanados os princípios básicos da *shearography* e será apresentada uma proposta de aplicação da técnica. Para isso serão selecionados os componentes óticos e projetado o interferómetro que os permite acomodar. O interferómetro será fabricado com recurso a técnicas de fabrico aditivo recorrendo a uma impressora 3-D. O dispositivo proposto será descrito e caracterizado em ensaios laboratoriais para ser aplicado na inspeção não destrutiva de uma peça fabricada em fibra de carbono usada pela indústria aeronáutica.

## 1.1 Motivação

Na engenharia revela-se essencial a utilização e desenvolvimento de ferramentas de auxílio ao projeto, tais como os métodos experimentais ou numéricos. Estes métodos, quando usados complementarmente, revelam-se úteis no desenvolvimento e validação de novos modelos. Para além das questões acima referidas existe também a necessidade de monitorização estrutural, por exemplo, na manutenção preditiva e nas operações de inspeção.

A utilização de materiais compósitos é cada vez mais recorrente e as aplicações deste tipo de material têm-se alastrado a diversos ramos da indústria. É comum a utilização e seleção deste tipo de materiais para os mais diversos componentes de engenharia, por exemplo: na fuselagem de aeronaves, na indústria automóvel, e em aplicações diversas sobre a forma de placas, tubos, etc. O fabrico de componentes ajustados à função “*tailored*” ou integrando sensores para a sua monitorização são algumas das novas soluções de engenharia tornadas possíveis com o aparecimento dos compósitos.

Os materiais compósitos devido à sua forma construtiva são suscetíveis ao aparecimento de defeitos, quer devido aos processos de fabrico, quer à sua utilização em serviço e até mesmo resultantes de matérias-primas defeituosas. De acordo com o The Welding Institute (TWI) estes defeitos podem ser classificados de acordo com o constituinte afetado ou a fase do ciclo de vida em que ocorre a falha. Deste modo os efeitos podem ocorrer:

- Nas fibras ou distribuição de fibras;
- Na matriz ou ligação fibra-matriz;
- Durante a produção;
- Em serviço.

O TWI apresenta, também, alguns exemplos de defeitos que tipicamente podem ocorrer em compósitos: delaminações; fendas; descolamentos; vazios; dano de impactos ou presença de água; porosidades; inclusões; erosão; entre outros.

Algumas das causas mais comuns que provocam defeitos são, por exemplo: mau alinhamento ou rotura das fibras, inclusões que contaminam a matriz ou ciclo de cura incorreto, tudo isto durante a produção. Já em serviço estas peças podem estar sujeitas a sobrecargas, cargas de impacto, sobreaquecimento, ingestão de água e a fadiga. Por exemplo no caso da aeronáutica a fadiga é provocada por variação de pressão e esforços gerados durante a descolagem, aterragem e em voo, assim como variação de temperatura. Para além dos esforços previstos podem ocorrer por acidente impactos que introduzam algum defeito na peça, como acontece com a manipulação descuidada de bagagens, queda de ferramentas durante operações de manutenção ou impactos com aves na vizinhança dos aeroportos, fenómeno designado por “*bird strike*”.

Os defeitos internos, tais como os interlaminares são de difícil deteção sem recurso a técnicas complexas. As técnicas de interferometria laser, em particular a *shearography*, oferecem uma solução com enorme potencial para uma abordagem a este problema, tornando possível a deteção de defeitos, visualmente impercetíveis, no interior de peças compósitas. Utilizando a elevada sensibilidade destas técnicas com protocolos de carga/excitação apropriados é possível detetar defeitos de vários tipos mesmo no interior dos componentes, desde que estes provoquem efeitos na superfície.

Atualmente existem alguns dispositivos que permitem que esta técnica possa ser utilizada em ambiente industrial ou de hangar, tornando possível a deteção de defeitos de forma razoavelmente expedita. Este facto torna esta técnica extremamente útil, por exemplo na



indústria aeronáutica, onde um defeito de delaminação poderia ter consequências catastróficas e fatais.

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consiste na construção de um sistema de NDT baseado na utilização da técnica de interferometria holográfica normalmente designada por *Shearography*. Utilizando as modernas técnicas de projeto e de produção de componentes procurar-se-á uma solução que permita obter de forma expedita e a baixo custo um dispositivo operacional para NDT em materiais compósitos.

Como objetivos secundários pode citar-se a aprendizagem na utilização de uma técnica ótica que se baseia em interferometria holográfica recorrendo ao interferómetro de Michelson. Trata-se de um assunto que apenas é abordado no final do mestrado integrado no âmbito da disciplina Mecânica Experimental e que implica conhecimentos de ótica geométrica, ótica coerente além de registo e processamento de imagem.

É também objetivo secundário a seleção de técnicas de produção de forma expeditas e versáteis que permitam construir rapidamente componentes necessárias à fixação dos componentes óticos. Neste contexto deverá procurar-se formas simples e compactas que permitam obter dispositivos com a estabilidade necessária à sua utilização em NDT.

Finalmente deve referir-se que a integração dos vários conhecimentos num protótipo utilizável e a sua caracterização e aplicação na inspeção de um componente real fazem também parte integrante dos objetivos do presente trabalho.

Em concreto, juntando estes objetivos pretende-se conceber e construir um equipamento que tenha capacidade para detetar defeitos, delaminações, inclusões, fendas, etc. em materiais compósitos.

## 1.3 Contribuições deste trabalho

Existem no mercado aparelhos que permitem fazer a avaliação não destrutiva de defeitos, no entanto estes tendem a ter custos elevados e são muitas vezes de grandes dimensões. As diversas soluções existentes no mercado são normalmente dispendiosas e muito baseadas na utilização de *software* dedicado desenvolvido de acordo com a aplicação. Deste modo os sistemas existentes são de utilização laboratorial ou pertencem a empresas de grande dimensão associadas ao projeto de componentes em compósito que os utilizam em NDT.

Com este trabalho pretende-se mostrar que é possível criar um sistema de *shearography* para deteção de defeitos com custos comparativamente baixos e num sistema compacto. Ao fazer esta abordagem procura-se também identificar técnicas de fabrico alternativas e demonstrar as suas vantagens e limitações para a construção de um dispositivo com as funcionalidades necessárias à NDT.

É também demonstrado que com recurso a ferramentas de fabrico aditivo é possível criar interferómetros com diversas configurações, que dependem apenas da intenção do projetista. Embora estas técnicas tenham uma elevada resolução e sejam bastante sensíveis a perturbações, comparativamente a outras técnicas NDT, um interferómetro fabricado em polímero, PLA, com recurso a uma ferramenta de fabrico aditivo poderá ser adaptado de acordo com a aplicação a que se destina.

É também provado que as técnicas óticas embora caíam tradicionalmente na área da física podem ser estudadas desenvolvidas e aplicadas por alunos formados em engenharia mecânica. Se o objetivo for focado na aplicação existe uma evidente vantagem em poder adequar o dispositivo às características dos materiais a inspecionar e ao desenvolvimento das técnicas de excitação/carregamento necessária a evidenciar os vários tipos de defeitos.

Em suma prova-se que um sistema básico de *shearography* comparativamente barato e bastante compacto pode ser modelado, construído e aplicado com métodos simples. Explorando a geometria, as técnicas construtivas próprias do fabrico aditivo, o tipo de montagem e os materiais disponíveis é possível construir dispositivos apropriados à sua aplicação em NDT.

## 1.4 Estrutura da Tese

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. Estes capítulos relacionam-se com o fluxo de trabalho da tese. Os capítulos são sintetizados de seguida.

Capítulo 1 – Neste capítulo é feita uma introdução à dissertação e é apresentada a motivação para a sua realização.

Capítulo 2 – No segundo capítulo é apresentado um estado de arte de algumas técnicas de NDT e referidos alguns exemplos de aplicação da técnica apresentada na dissertação.

Capítulo 3 – No terceiro capítulo é feita uma apresentação do interferómetro de Michelson. Apresenta-se o contexto histórico em que este foi desenvolvido quais as motivações. Depois apresentam-se exemplos de utilização do interferómetro de Michelson em interferometria e as suas capacidades.

Capítulo 4 – No quarto capítulo é feita uma apresentação teórica dos princípios físicos da técnica. Os princípios abordados são o comportamento da luz, a interferência e coerência, o conceito do speckle e tamanho de speckle, descordação, modulação de fase e como quantificar as deformações, relacionando-as com variações na fase de interferência.

Capítulo 5 – No quinto capítulo apresenta-se o projeto do sistema de *shearography*. Aqui são apresentados os elementos que compõem o interferómetro, depois é descrita a modelação do sistema e o seu fabrico. São, também, apresentadas algumas dificuldades que surgiram durante esta fase. Por fim é apresentado o sistema final e é descrito o seu funcionamento.

Capítulo 6 – No sexto capítulo são apresentados os ensaios e resultados obtidos com o sistema. Os ensaios são realizados a duas peças distintas, em que se fazem variar vários parâmetros. Os resultados são analisados e prova-se que o sistema tem capacidade para detetar defeitos visualmente impercetíveis.

Capítulo 7 – No sétimo capítulo são apresentadas as conclusões alcançadas e é apresentada uma perspetiva de trabalhos futuros, por exemplo melhorias no sistema que poderiam ser feitas a vários níveis.

## 2. Estado da arte

### 2.1 Estado da arte

As técnicas de inspeção não destrutiva, NDT, constituem atualmente uma ferramenta imprescindível em diversos ramos da engenharia e da indústria. O recurso a estas técnicas é, muitas vezes, imprescindível na avaliação de diversos componentes e estruturas. Trata-se de uma ferramenta preciosa na validação de projetos e na inspeção de componentes principalmente no que respeita à avaliação da integridade estrutural. As técnicas NDT complementadas com ferramentas analíticas, por exemplo o método de elementos finitos, MEF, proporcionam maior segurança na avaliação do comportamento de um componente ou estrutura quando em serviço.

As técnicas NDT foram desenvolvidas pela engenharia para a inspeção de componentes e estruturas. No caso das estruturas metálicas podem citar-se técnicas de NDT como: a extensometria, as baseadas nas variações no campo magnético ou Corrente de Foucault, a radiografia, os líquidos penetrantes e as baseadas na propagação de ultrassons, para além destas pode ainda considerar-se a inspeção visual sem ou com recurso a instrumentação como é a “*D-sight*” para inspeção rápida de superfícies sujeitas a impactos. Estas técnicas, por exemplo os raios X e Gama são usadas em NDT nas mais diversas aplicações, como a inspeção de peças soldadas ou de fundição, a inspeção de *airbags* em automóveis, a inspeção de alimentos enlatados e em indústrias como a petroquímica ou a aeroespacial, para além de ser utilizada como método de controlo de segurança em aeroportos, etc... para além destas aplicações estas técnicas tem uso na investigação de engenharia, por exemplo, em conjunção com ensaios mecânicos são uteis na investigação de propagação de fendas nos provetes.

Os métodos não tradicionais foram desenvolvidos para ultrapassar as dificuldades encontradas com a crescente utilização de materiais compósitos não metálicos, como são, por exemplo, as estruturas tipo sandwich, os laminados e os componentes obtidos por enrolamento filamentar, entre outros. Dentro destas técnicas mais recentes encontram-se a termografia, os métodos óticos, inspeção por raio X ou raios Gama assim como a análise da propagação de ondas elásticas que medem variações na velocidade de propagação das ondas, ou métodos que avaliam a ressonância localmente. Mais recentemente uma técnica estudada para a inspeção de compósitos é a designada *tap testing*, que como indica o nome consiste em bater levemente, normalmente com um martelo metálico, na superfície da peça em estudo. As ondas acústicas geradas são afetadas por variações locais de rigidez, que podem indicar a presença de defeito. Esta técnica é amplamente usada, no entanto os resultados dependem muito da perícia do operador, mais recentemente tem sido desenvolvidos sistemas automatizados que avaliam diretamente as ondas acústicas.

Geralmente estas técnicas são categorizadas como de medição global ou local ou discreta, de acordo com a área de medição. As técnicas óticas oferecem uma solução interessante para NDT, já que usam métodos globais e sem contacto a que podem aliar uma elevada resolução se for

utilizada radiação coerente, vulgarmente designada pelo acrónimo LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. A vulgarização da utilização deste tipo de radiação faz com que este acrónimo seja frequentemente utilizado como substantivo para referir este tipo de radiação coerente e escrito como laser.

A acrescentar a estes fatores acresce que a deteção de delaminações por via da alteração de características mecânicas é vastamente referenciada na literatura como técnica preferencial para a deteção do defeito. As técnicas que lidam com características mecânicas do material avaliam a resposta estrutural, estática ou dinâmica, da estrutura ou componente, por exemplo avaliando as frequências modais e respetivas formas nodais, medindo a distribuição de deslocamentos, de rotações ou curvaturas, e respetivas derivadas destas quantidades, avaliação dos coeficientes de flexibilidade, etc.

Neste capítulo serão abordadas algumas técnicas de NDT como método de deteção de defeitos. Serão descritas algumas técnicas, assim como, alguns exemplos da aplicação da *shearography*, quer na engenharia, quer na indústria.

Apenas serão descritas algumas técnicas e as suas respetivas aplicações de modo a introduzir o assunto da inspeção não destrutiva ao leitor e permitir uma posterior comparação com a *shearography* como técnica de NDT. As técnicas apresentadas foram selecionadas pela sua abrangência e por serem, na literatura científica, recorrentemente comparadas com a *shearography* e serem utilizadas em aplicações semelhantes na área da NDT, nomeadamente a inspeção de compósitos.

Estas técnicas podem medir deslocamentos ou derivadas de deslocamentos, extensão, temperatura ou variações acústicas, etc. Alguns exemplos de técnicas que podem medir deslocamentos são: a interferometria de *speckle*, o Moiré geométrico e interferométrico, interferometria holográfica, a correlação digital de imagem (DIC), etc.

A extensão ou deformação pode ser obtida por diferenciação numérica ou diretamente recorrendo, por exemplo, a *shearography*, o *speckle shearing photography* ou o Moiré diferencial. Estas técnicas óticas podem ser classificadas em duas categorias diferentes interferométricas ou não interferométricas [1], de acordo com a radiação utilizada na iluminação.

Para além destas técnicas óticas, existem outras que podem ser utilizadas como métodos de NDT, as mais comunmente abordadas e comparadas com a *shearography* digital e as técnicas acima descritas como a termografia de infravermelhos e os *Ultrasonic C-Scan*.

As técnicas de NDT mais utilizadas são, na sua designação anglo-saxónica categorizadas em: NDT-Non destructive testing; NDI-Non destructive Inspection e NDE-Non destructive evaluation. Uma definição possível do que é inspeção não destrutiva é dada por [2]: “Um processo ou procedimento para determinar a qualidade ou características de um material, objeto ou estrutura sem alterar permanentemente o elemento ou as suas características”. De acordo com a quantidade de informação do dano as técnicas podem ser ordenadas por grau ascendente [3]:

- Nível 1: Métodos que avaliam a presença de dano na estrutura;
- Nível 2: Métodos que avaliam a localização do dano na estrutura;
- Nível 3: Nível 2 e estimativa/quantificação do dano e da severidade do dano;
- Nível 4: Nível 3 e estimativa do impacto estrutural do dano e predição do tempo útil de vida da estrutura.

Tipicamente as técnicas NDT focam-se na localização e dimensão do defeito e são, por isso, classificadas como nível 1 ou 2 [4].

## 2.2 Principais técnicas de NDT

Tendo em conta a definição anteriormente apresentada para as técnicas de NDT e as técnicas de mecânica experimental mais utilizadas para este propósito podem destacar-se algumas técnicas que têm vindo a ser utilizadas com sucesso para detetar e identificar danos em estruturas, principalmente as construídas com materiais compósitos.

**Termografia de infravermelhos** é uma técnica sem contacto que recorre à deteção de radiação infravermelha, invisível a olho nu. A termografia pode ser usada para avaliar componentes estruturais, medindo a distribuição de radiação infravermelha, dados que após processados fornecem informação sobre os componentes em estudo. A termografia de infravermelhos é geralmente dividida em duas versões: Termografia de infravermelhos passiva e termografia de infravermelhos ativa. Em termografia passiva temperaturas anormais indicam possíveis locais com irregularidades na transferência da radiação térmica. A técnica é maioritariamente utilizada em inspeções qualitativas para detetar a localização de anomalias ou defeitos. A termografia ativa foi desenvolvida para proporcionar informação mais precisa, tendo em conta a taxa de transferência de calor e os diferentes comportamentos térmicos dos materiais [5]. A termografia tem sido usada com sucesso na inspeção de defeitos em muitas aplicações industriais, por exemplo, inspeção de componentes na indústria aeronáutica e automóvel, ligação adesiva e soldadura por pontos, assim como na inspeção de reservatórios de pressão ou de *pipelines* [6].

**Tecnologia tera-hertz (THz)** Trata-se de uma técnica que utiliza radiação na gama de frequências de 0.1 THz a 10 THz, que abrange o espectro entre a radiação designada por micro-ondas e radiação infravermelha. Com a técnica de THz o utilizador, usualmente conhece o comprimento de onda usado para iluminar o objeto e utiliza detetores para registar a frente de onda, após esta interagir com o objeto, perto da fonte de radiação. A tecnologia baseada na radiação designada por THz tem feito bastantes progressos desde os anos 80. Devido às ondas THz terem boa penetração em muitos materiais não metálicos e não húmidos, tais como espumas, cerâmicos, vidros, tintas, resinas ou compósitos permite que esta técnica tenha sido bastante utilizada na inspeção não destrutiva [7]. Usualmente esta técnica é dividida em duas categorias de acordo com a utilização da energia: contínua e descontínua. Em comparação com outras técnicas a NDT por THz possui algumas vantagens únicas na deteção de defeitos internos em materiais não metálicos. A radiação THz consegue penetrar em materiais opacos, por exemplo tecidos e plásticos, e detetar defeitos internos que a luz visível não conseguiria. Esta técnica pode, também, ser utilizada em materiais isolantes, onde a termografia de infravermelho não pode ser aplicada. Existem dois tipos de *THz imaging* classificada de acordo com a forma de deteção passiva e ativa. A técnica de *THz imaging* baseia-se na aplicação de radiação tera-hertz para a deteção e identificação de substâncias ou objetos ilícitos escondidos, como explosivos, agentes químicos ou biológicos e drogas. Esta técnica foi utilizada com sucesso na deteção de defeitos na espuma de isolamento, SOFI layers (Spray on Foam Insulation), térmico do vaivém espacial. Recentemente esta técnica tem conhecido muitas aplicações na área de NDT, mais concretamente na indústria aeroespacial. Para além da espuma de isolamento do vaivém, têm sido utilizadas em testes estruturais noutros materiais chave no vaivém, como por exemplo: na deteção de defeitos na camada adesiva das peças cerâmicas, nomeadamente para identificar descolamentos [8]. O laboratório de pesquisa do exército americano e a NASA têm estudado as capacidades da técnica para a deteção de corrosão por baixo de pinturas. Resultados experimentais demonstram que a espessura da camada de tinta e de corrosão tornam a superfície irregular e que as ondas *tera-hertz* podem ser usadas para a deteção de corrosão [9], [10]

As técnicas de THz podem também ser aplicadas em NDT de peças de compósitos em carbono utilizadas em estruturas aeronáuticas. Estudos mostram que o THz pode fornecer informação quantitativa sobre a extensão e severidade do dano térmico e para detetar defeitos em longarinas de aviões fabricadas em poliuretano e espuma de resina epóxi [11].

Outras aplicações destas técnicas para NDT são, por exemplo: a deteção de defeitos de fadiga térmica em esferas cerâmicas de rolamentos [12] e a deteção de micro falhas em embalagens seladas de plástico, em que o THz consegue insuflar defeitos preenchidos com água e, desta forma, deteta-los [13]. O uso de THz em modo estroboscópico pode ainda ser usado para estudar a rotura de provetes de fibra de vidro e resina de epóxido, sendo possível estudar fendas ou defeitos interlaminares que ocorram durante o ensaio [14]. A avaliação de superfícies metálicas com estas técnicas permite identificar defeitos superficiais, tais como, protruções ou riscos na superfície [15]. A utilização de THz em modo pulsado é utilizado para inspecionar juntas de plástico que foram soldadas [16]. Materiais compósitos avançados como estruturas tipo *sandwich*, constituídas por um núcleo de espuma com peles de fibra de vidro e resina de epóxido, podem ser avaliados com THz e é, também, possível identificar infiltrações de água na estrutura.

**A inspeção por ultrassons** é também uma técnica muito divulgada para NDT em materiais compósitos. O som, como técnica para caracterizar objetos ou meios, é usado desde os anos 30. O sonar foi das primeiras técnicas usadas para caracterizar objetos submersos. Mais tarde o sonar inspirou investigadores a usarem ultrassons em aplicações de medicina, por exemplo para detetarem tumores ou estudarem o fluxo sanguíneo para melhor compreenderem o sistema cardiovascular. Ao nível do NDT em engenharia os NDT foram inicialmente estudados como método de deteção de objetos metálicos, depois foram estudadas as suas capacidades para detetar falhas em sólidos. Atualmente a técnica de ultrassons tem vasta aplicação em medicina e na NDT em engenharia. As variantes mais comuns em NDT são o A-Scan, B-Scan e o C-Scan. Estas variantes referem-se à forma como a informação é recolhida e apresentada e, como o nome indica, são técnicas de varrimento. A apresentação A-Scan devolve a intensidade do sinal, a apresentação B-Scan devolve o tempo de propagação, que pode ser convertida numa profundidade, a apresentação C-Scan devolve a localização e geometria do defeito. A mais referenciada em NDT é o C-Scan, e é comumente utilizada na inspeção e controlo de qualidade de materiais. Esta técnica é aplicada na inspeção de produtos elétricos e eletrónicos, produção de componentes metálicos e compósitos, assim como em estruturas de aeronáutica e componentes de motores a jato, tubagens e reservatórios de pressão, estruturas navais, pontes e maquinaria e na deteção de defeitos dos mais diversos componentes em várias indústrias. O método de eco pulsado é o método mais usado na inspeção por ultrassons, nesta configuração é detetado o eco provocado quando um impulso de ultrassom atinge uma descontinuidade, fenda ou falha. A tecnologia *C-scan* permite registar informação proveniente do interior de uma peça num plano sobreposto ao plano da peça. Tanto a posição da falha ou defeito como a sua dimensão são obtidas assim como a localização da falha ao longo da espessura [17]. As técnicas de *C-scan* podem ser utilizadas para avaliar a espessura de um objeto ou na deteção de falhas internas, por exemplo, corrosão, delaminações e outras falhas planares [18].

**O ESPI**, acrónimo de *Electronic Speckle Pattern Interferometry*, também conhecido como holografia TV, pois utiliza os princípios da holografia com registo dos padrões interferométricos em vídeo. Esta técnica tem como principal vantagem não recorrer aos processos extremamente morosos do processamento químico e “*setup*” utilizados com os registos em placa holográfica. Esta técnica foi desenvolvida nos anos 1970 do século passado de forma simultânea por diferentes grupos [19, 20] com o objetivo de eliminar o tempo consumido no processamento de placas holográficas. Com esta técnica é possível registar 25 ou 30 holograma/s dependendo da frequência do sistema vídeo utilizado. Após a introdução

dos sistemas digitais de imagem foram desenvolvidas algumas variantes que são conhecidas como: *electronic holography*, *electro-optic holography* e *digital holography*.

O ESPI baseia-se na utilização de um laser juntamente com um interferómetro para registar a fase das imagens. O feixe é dividido de forma a que um padrão de *speckle* proveniente da superfície dos objetos seja sobreposto numa frente de onda especular que constitui o feixe de referência. Nesta técnica é utilizada uma câmara para registar as imagens obtidas e um sistema de processamento de imagem que permite obter as franjas de correlação diretamente num monitor. No ESPI uma gravação digital de um holograma é feita na matriz de sensores de um CCD ou CMOS e posteriormente é feita a reconstrução numérica da frente de onda num computador. O holograma é o padrão de interferência gerado pela sobreposição de um feixe objeto com um feixe de referência. O ESPI pode também ser aplicado no estudo de problemas dinâmicos, que pode ser conseguido utilizando lasers de impulso [21, 22].

O ESPI é uma técnica idêntica à *shearography* - usualmente utiliza uma configuração semelhante ao interferómetro de Michelson, recorre à interferência de luz coerente para fazer a medição e os princípios físicos pertinentes são os mesmos. Contudo apresenta, também, diferenças significativas, por exemplo, as quantidades medidas são diferentes e a *shearography* é insensível a movimentos de corpo rígido, etc.

## 2.3 Breve história da holografia

A holografia surgiu em 1948 com os trabalhos de Dennis Gabor, enquanto procurava melhorar a resolução de um microscópio eletrónico. A holografia baseia-se na gravação de toda a informação contida numa frente de onda proveniente da superfície de um objeto iluminado. Esta técnica de registo permite, ao contrário da fotografia tradicional, gravar toda a informação contida numa frente de onda, amplitude e fase, em vez de apenas registar intensidade luminosa, daqui surge o termo holograma para designar a gravação. O termo holograma resulta da aglutinação das palavras gregas *holos* e *graphé* que neste contexto significam toda a informação.

Quando a holografia foi apresentada não existia ainda grande disponibilidade de fontes de radiação coerente e, por isso, a técnica não teve grande divulgação. No entanto, com a descoberta do laser em 1960 a holografia ganhou um novo impulso que possibilitou o seu desenvolvimento. Inicialmente a holografia era vista apenas como uma curiosidade científica devido as imagens espetaculares que produzia. Contudo, em meados da década de 60 alguns autores interessaram-se pela aplicação da holografia à metrologia contribuindo para o seu desenvolvimento. Pelo seu contributo para a ciência Dennis Gabor foi agraciado com o prémio nobel da física em 1971.

A metrologia ótica baseada na holografia compara padrões de interferência para avaliar alterações na fase e daí avaliar qualquer variação de grandezas que alterem essa propriedade da luz, por isso estas técnicas são geralmente designadas por técnicas de interferometria holográfica. Recebem este nome todas as técnicas interferométricas em que pelo menos uma das frentes de onda envolvidas na interferência provém de um holograma. Os interferogramas na holografia clássica são gravados em placas fotográficas ou filmes termoplásticos, que implicavam um ambiente livre de vibrações e necessitam de um processo de revelação química ou térmica bastante moroso. Isto limitou a utilização desta técnica ao ambiente laboratorial. Para colmatar estas desvantagens apareceram vários trabalhos em que propuseram a utilização de uma câmara vídeo para a gravação dos hologramas e a reconstrução do holograma realizada no computador. Mais tarde surgiram os sensores digitais que deram origem as técnicas que hoje se designam por ESPI, ou DSPI *digital speckle pattern interferometry* e por holografia digital.

A *shearography* evoluiu a partir da técnica ESPI, como alternativa às técnicas holográficas clássicas. Foi proposta por Hung na universidade de Oakland, Califórnia, em 1982, como opção para a medição de deformações e avaliação não destrutiva. Outros autores pioneiros nesta técnica foram John Butters da universidade de Loughborough, Reino Unido, e S. Nakadate no Japão. O primeiro sistema comercial foi introduzido no mercado pela Northrop Grumman em 1987 para apoio à produção do USAF B-2 Stealth Bomber (Bombardeiro furtivo da força aérea dos Estados Unidos) [23]. Ao contrário do ESPI a *shearography* não é sensível aos deslocamentos, mas à variação de deslocamentos e é praticamente insensível a movimentos de corpo rígido. Controlando a amplitude do *shear* é possível uma boa aproximação à derivada dos deslocamentos verificados numa superfície difusa. Esta técnica diferenciou-se de outras técnicas NDT por identificar anomalias na deformação provocadas por fragilidades estruturais devido à presença de defeitos. Outras aplicações propostas incluem a medição de deformações, avaliação de propriedades do material, avaliação de tensões residuais, avaliação de forma 3-D, análise de vibrações ou deteção de fugas [24].

## 2.4 Normalização e Certificação

Em 1993 a sociedade americana para a inspeção não destrutiva (ASNT) criou o comité de métodos de laser para desenvolver os requisitos de certificação para operadores de sistemas de *shearography*. A ASNT oferece vários níveis de certificação em *shearography* para técnicos de NDT.

Devido ao crescente uso de materiais compósitos na indústria aeroespacial a NASA reconheceu a necessidade de certificação e normalização específica para compósitos utilizados na indústria do espaço. Atualmente existe uma norma da ASTM que inclui as técnicas de ultrassons, radiografia, termografia, emissão acústica e *shearography* para aplicação em NDT de compósitos usados no espaço [23].

Ao nível europeu, por exemplo, a norma EN-4179 oferece indicações sobre a aplicação de algumas técnicas NDT, nomeadamente a *shearography*, na indústria aeronáutica, ao nível da produção, manutenção, etc. Esta norma aplica-se ao pessoal responsável pela utilização das técnicas, assim como ao pessoal responsável por definir procedimentos ou por treinar técnicos NDT [25].

Para além destes exemplos existem, ainda, outros organismos internacionais que se dedicam à produção de normas no âmbito da inspeção não destrutiva, por exemplo: American Society for Testing and Materials (ASTM); Society of Automotive Engineers (SAE); American Society of Mechanical Engineers (ASME); The American Welding Society (AWS); International Organization for Standardization (ISO); American National Standards Institute (ANSI).

## 2.5 Exemplos de aplicações da *shearography*

A *shearography* tem aplicação nas mais diferentes indústrias e a sua aplicabilidade como técnica de controlo de qualidade ou de NDT foi provada por vários autores.

Por exemplo, ao nível da certificação, está descrita a metodologia para a inspeção nas indústrias marítima, eletrónica, aeroespacial ou de borracha e pneus.

A título de exemplo refere-se a empresa Laser Technology Inc que descreve um estudo sobre as pás de um rotor de helicóptero, que foram analisadas para a deteção de defeitos. As pás podem ser simples vigas ocas de material compósito com um revestimento de folha metálica



ou fibra de vidro ou outro material compósito ou podem incorporar estruturas tipo favo de mel, componentes metálicos, espumas ou compósitos laminados [26].

Segundo a Laser Technology Inc o tipo de solicitação ideal para detecção de diferentes tipos de defeitos nas pás do rotor pode ser:

- Excitação térmica para impactos, delaminações, descolamentos.
- Vácuo para descolamentos em estrutura favo de mel ou dano no núcleo.
- Excitação por vibração para descolamentos, delaminações em laminados sólidos ou no núcleo metálico de estruturas favo de mel.
- Pressão para defeitos de impacto e delaminações nos filamentos de vasos de pressão.

Também na universidade da Cidade do Cabo se tem vindo a trabalhar com *shearography* para inspeção não destrutiva como, por exemplo, a apresentação de uma metodologia para a inspeção de um garfo metálico do trem de aterragem de um avião [27].

O centro de inspeção não destrutiva da universidade de John Hopkins, USA, aplicou a *shearography* para a inspeção não destrutiva de painéis de aço e poliuretano espessos, usados em aplicações marítimas. Este material é usado em embarcações militares por proporcionar atenuação de som, amortecimento de vibrações e apresenta boa capacidade para absorver choques. Para além disto o poliuretano tem muito baixa condutividade térmica que aliada a grandes espessuras tornam as técnicas de termografia ou ultrassons pouco convenientes para a inspeção não destrutiva destes painéis [28].

A indústria de borracha tem recorrido à *shearography* como técnica de controlo de qualidade e de detecção de defeitos. A administração federal de aviação, que é responsável pela aviação civil nos estados unidos, tem regulamentos próprios para a inspeção de pneus de aviões com recurso à *shearography*. Tipicamente a inspeção de pneus sem jante é feita numa câmara de vácuo onde se varia ligeiramente a pressão, cerca de 50 mmHg ou 0.07 bar, sendo possível, por exemplo, detetar descolamentos entre o reforço metálico e a borracha do pneu e descolamentos entre as telas [29].

A *shearography* pode também ser uma técnica importante para identificar a presença de tensões residuais, por exemplo uma montagem com sensibilidade no plano pode ser usada para medir tensões com a técnica do furo ou em alternativa pode ser criado um micro entalhe na peça que se pretende estudar e usando uma montagem com sensibilidade fora do plano e deste modo pode detetar-se a presença de tensões residuais [30].

Esta técnica pode também ser usada para estudar o comportamento modal de componentes ou detetar defeitos com recurso a excitação por vibração. Um exemplo desta aplicação é o projeto da NATO-WEAG, que utiliza a *shearography* com recurso a excitação por vibração para detetar defeitos em painéis tipo *sandwich* utilizados na construção de navios de guerra. O princípio básico desta aplicação consiste em excitar o painel dinamicamente com um *shaker* e gravar o padrão de vibração. É possível gravar as frequências e modos naturais de vibração do objeto, assim como outras vibrações, devido a ondas superficiais. Um defeito na estrutura irá provocar anomalias no padrão vibratório e assim será detetado [31].

Também o instituto Onera, instituto francês de pesquisa em aeronáutica, usa a técnica de *shearography* para detecção de defeitos com recurso a medições dinâmicas. Um exemplo desta utilização são os estudos realizados em compósitos de espuma. Segundo o Onera este tipo de compósitos são muitas vezes usados na indústria aeroespacial pelo que é necessário garantir que na ligação entre o núcleo de espuma e o revestimento metálico não existem descolamentos. O Onera afirma que a *shearography* é ideal para a inspeção não destrutiva deste material, em contraste com a termografia que, devido à espuma e o ar, que existe na zona de descolamento, terem condutividades térmicas muito idênticas produz fracos resultados. O método consiste na utilização de um sistema *shearography* baseado num interferómetro de Michelson e num laser pulsado. A ideia básica consiste em fazer propagar ondas acústicas através da camada de espuma, onde uma má ligação entre os materiais gera discrepâncias, que após algum processamento de imagem revela o defeito. A excitação acústica é provocada por um altifalante e o feixe de laser é sincronizado com o sinal de excitação acústica. A análise dinâmica tem a vantagem de oferecer maior rigor geométrico e mais sensibilidade, assim como melhor compreensão do tipo de defeito. Segundo o Onera este sistema ótico-acústico proporciona uma boa técnica de NDT para ser usada em ambiente industrial, por ser expedito, de medição global e proporcionar resultados robustos [32, 33].

Com estes exemplos percebe-se que a *shearography* é uma técnica com amplas aplicações na indústria e na ciência, quer no sector civil, quer militar, assim como é uma ferramenta útil para a investigação científica ou o desenvolvimento de novos produtos.

## 2.6 Breve descrição da técnica para medição estática.

Com a *shearography* são utilizados fenómenos óticos para detetar a presença de defeitos internos. A técnica utiliza um interferómetro, usualmente do tipo Michelson devido à sua configuração simples, que divide um feixe em duas frentes de onda: a frente objeto e a frente de referência e cria um desvio lateral (*Shear*) que gera um padrão de interferência. Neste interferómetro ambas as frentes de onda são de *speckle* e resultam da difusão da luz pela superfície do objeto. Dado que ambos os braços do interferómetro percorrem um caminho comum na maior parte do seu percurso este interferómetro é menos sensível a perturbações que afetam simultaneamente os dois feixes. Depois de geradas várias imagens e após o seu processamento é possível obter o gradiente de deslocamento segundo uma direção. Na sua configuração mais básica é utilizado um único feixe laser para iluminar o objeto numa situação de solicitação estática. Se for introduzido um modulador de fase num dos feixes é possível processar a informação do objeto e um programa de processamento de imagem e calcular o gradiente de deslocamento fora do plano.

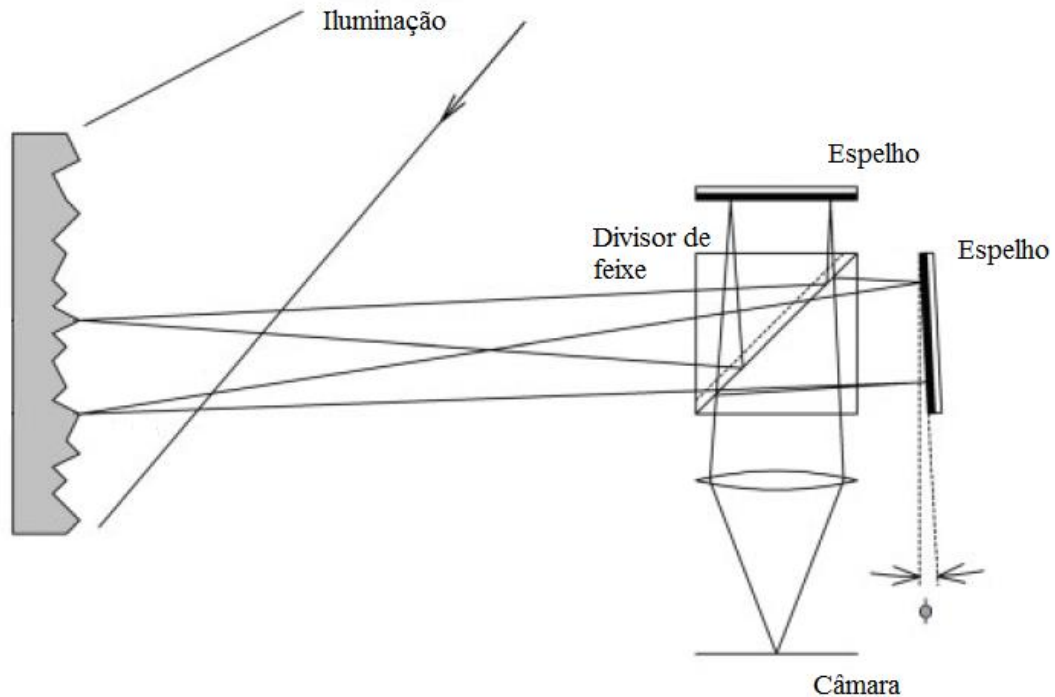


Figura 2.1 – Esquema da montagem ótica utilizada num sistema de shearography baseado no interferômetro de Michelson.

Na medição estática de gradientes de deslocamento são comprados dois estados de deformação para detetar anomalias provocadas por defeitos. Neste caso a diferença de fase que resulta da comparação dos dois estados de deformação está relacionada com os gradientes de deslocamentos.

Na forma mais simples da técnica são gravadas duas imagens correspondentes a dois estados de deformação diferentes que quando comparadas geram um padrão de franjas. Estas franjas são isolinhas ou seja indicam zonas de igual magnitude de derivada segundo a direção do *shear*. Como os sensores digitais usados para o registo dos interferogramas são apenas sensíveis à intensidade luminosa a gravação da fase é obtida através da interferência entre frentes de onda que a converte em variações de intensidade.

Na medição estática a fase da interferência é determinada recorrendo à técnica de modulação temporal de fase (*phase step* ou *phase shifting*), que permitem uma avaliação quantitativa da fase do interferograma. Neste método de cálculo são gravados vários padrões de interferência com diferenças de fase, conhecidas. Na prática existem várias formas para produzir o salto de fase necessário: acoplamento de um transdutor piezoelétrico a um dos espelhos do interferômetro; alongamento de uma fibra ótica enrolada num cilindro piezoelétrico; dupla refração em modulação eletro-óptica; alteração do índice de refração; Alteração da frequência ou comprimento de onda da luz emitida pela fonte coerente. A solução geralmente utilizada é a primeira por ser económica, fácil de implementar e conduzir a bons resultados. O cálculo de fase da interferência envolve a resolução de um sistema de equações não linear com pelo menos três incógnitas, sendo o salto de fase uma das incógnitas. A técnica necessita, portanto, de no mínimo três imagens diferentes registadas com um salto de fase conhecido [22]. O método mais comum envolve quatro imagens desfasadas de  $\pi/2$ , pois é um bom compromisso entre o número de imagens e a tolerância ao erro introduzido no salto de fase. Além disso envolve também um algoritmo caracterizado pela simplicidade do modelo matemático. Utilizando esta técnica a obtenção do gradiente de deslocamentos resulta de um processo de cálculo que

envolve quatro imagens com o objeto estático sem carregamento e quatro imagens com o objeto estático solicitado por um carregamento. Estas imagens são normalmente gravadas de forma automática e após o processamento permitem obter o gradiente de deslocamento devido a esse carregamento.

Esta metodologia de aplicação da *shearography* para medição estática servirá como base para a realização deste trabalho, ou seja, a concepção e projeto do sistema serão desenvolvidos em função de um interferómetro de Michelson, um CCD para aquisição de imagem e a técnica de modulação temporal de fase para determinação da fase da interferência.

## 2.7 Métodos de carregamento em medição estática

A aplicação da *shearography* para NDT implica a excitação do objeto em estudo de forma a induzir deformações que revelem os defeitos existentes. Idealmente as tensões induzidas pela excitação devem produzir tensões idênticas às de serviço de forma a identificar os defeitos críticos que possam comprometer a integridade estrutural ou diminuir o tempo de vida da estrutura e ignorar defeitos puramente cosméticos. Deste modo podem reduzir-se as rejeições de peças conformes durante a inspeção. Contudo, mimetizar os esforços em serviço pode implicar processos algo complexos e formas mais práticas e expeditas de carregamento tem de ser aplicadas. Durante a solicitação do objeto é necessário precaver movimentos de corpo rígido excessivos pois estes causam descorrelação e, por isso, degradação da qualidade das franjas.

Os métodos típicos de excitação utilizados na *shearography* são os mesmos que já haviam sido desenvolvidos para a holografia. Estes são recorrentemente usados e não provocam movimentos de corpo rígido problemáticos à medição. Para a medição estática tipicamente recorre-se a aumento ou diminuição de pressão, e variações de temperatura. Para a medição estática pode ainda recorrer-se a solicitações acústicas ou excitação mecânica. Uma alternativa bastante eficaz para a deteção de humidade em plásticos ou compósitos não metálicos é o uso de micro-ondas que excitam as moléculas de água [29].

## 2.8 Porquê interferometria

Na área da mecânica experimental, em particular em NDT, as técnicas interferométricas têm alcançado grande proeminência relativamente a outras técnicas. A investigação já feita nesta área coloca estas técnicas na vanguarda da NDT. No entanto, existe ainda um grande potencial de desenvolvimento dentro destas técnicas, quer seja na redução de custos, quer na procura de novas aplicações e até mesmo no desenvolvimento de soluções já existentes.

Em relação a outras técnicas de inspeção de defeitos estas técnicas, por razões já referidas, apresentam grandes vantagens tais como: a medição é global e sem contacto, são técnicas não destrutivas, a excitação pode ser obtida recorrendo a radiação, térmica ou micro-ondas, de fraca intensidade que não provoca dano, sendo técnicas de elevada resolução a solicitação exigida é de baixa magnitude não provocando alterações permanentes no objeto, não existe necessidade de modificar o meio, recorrendo a lasers pulsados podem ser estudados objetos em movimento, podem ser estudados objetos de formas e dimensões arbitrarias, superfícies difusas e rugosas podem ser analisadas, a elevada resolução associada à utilização de métodos de processamento de imagem permite posterior diferenciação ou integração e determinar a extensão ou tensão local, ajustando a configuração é possível fazer medições com sensibilidade em diferentes direções, no plano ou fora plano [22].

## 2.9 Porquê a Shearography

Dentro das técnicas interferométricas a *shearography* destaca-se das restantes, pois apresenta várias vantagens que a tornam ideal em várias situações onde é necessária a inspeção não destrutiva para deteção de defeitos.

No âmbito das técnicas NDT a grande vantagem da *shearography* relativamente a outras técnicas interferométricas prende-se com o facto de esta ser sensível a gradientes de deslocamento, e não a deslocamentos como a maioria das técnicas interferométricas, tal como o ESPI, ou a holografia. Dado que a presença de defeitos num objeto usualmente gera deslocamentos localizados ou concentração de tensões é mais fácil relacionar a presença de um defeito com incongruências na extensão do que com incongruências em deslocamentos. Como a técnica é sensível a gradientes de deslocamentos é menos afetada por movimentos de corpo rígido [34].

Quando comparada com outras técnicas utilizadas em NDT a *shearography* oferece vantagens na deteção de defeitos críticos ao funcionamento do componente ou estrutura. Tipicamente, estas técnicas expõem defeitos superficiais e detetam defeitos internos que alterem a distribuição dos deslocamentos à superfície. A *shearography* permite detetar defeitos que possam afetar a deformação do corpo, ou seja, que possam induzir concentração de tensões nesse local. Desta forma a *shearography* é a ferramenta ideal para destrinçar os defeitos críticos de defeitos puramente cosméticos [34].

A *Shearography*, embora possa ter alguma sensibilidade a perturbações do meio envolvente, devidas a variação de temperatura, vibrações, etc., é muito menos sensível que outras técnicas interferométricas. Além disso, erros introduzidos por essas perturbações podem ser minimizados com utilização de “*setups*” adequados e com a experiência do utilizador. Devido a usar caminhos óticos idênticos e, normalmente de dimensão reduzida, não necessita de fontes com elevados comprimentos de coerência. O facto de ser pouco sensível a perturbações e de ser de fácil aplicação, comparando com outras técnicas interferométricas, faz com que a *shearography* seja a técnica ideal, quer em ambiente laboratorial, quer industrial para a inspeção de defeitos em estaleiro [34].

Outra vantagem da *shearography* prende-se com o facto de utilizar uma montagem ótica simples e fácil de conceber de forma compacta. Também beneficia com o desenvolvimento e constante inovação das indústrias: ótica, de fotografia e vídeo e de novos equipamentos eletrónicos cada vez menos dispendiosos e de melhor fiabilidade.



### 3. Interferómetro de Michelson

O interferómetro de Michelson, assim designado por ter sido desenvolvido pelo físico Albert Abraham Michelson para a experiência de Michelson-Morley em 1887, que pretendia detetar a presença do éter no universo. O interferómetro original é diferente dos atuais, pois na altura não existiam fontes de luz coerente. Contudo o seu princípio de funcionamento mantém-se inalterado até hoje. Este interferómetro consiste num conjunto de elementos óticos, espelhos, divisor de feixe, etc. que tem como objetivo separar um feixe proveniente de um emissor e, após manipulação dos dois feixes resultantes recombina-los, como se pode ver na figura 2.1. Michelson (1852-1931), nasceu em Strzelno na Prússia, atualmente Polónia, emigrou para os EUA e começou a sua carreira na academia naval, passou por algumas universidades europeias e foi depois professor de física na Escola de Ciência Aplicada de Case em Cleveland, EUA – onde ocorreu a experiência, lecionou na Universidade de Clark em Worcester, EUA e finalmente na universidade de Chicago, EUA. Pelo seu enorme contributo à física, na área da ótica, recebeu o prémio Nobel da Física em 1907 tornando-se o primeiro cidadão dos estados unidos galardoado com o nobel na área das ciências. A experiência na altura contrariou as expectativas e a presença do éter, assim como algumas das teorias sobre a propagação da luz foram descartadas. No entanto, não se pode considerar a experiência como um insucesso, de facto ela inspirou cientistas e contribuiu para o desenvolvimento de novas teorias.

Atualmente o princípio do interferómetro de Michelson é utilizado em diversas aplicações científicas e de engenharia, sendo bastante utilizado em diversos equipamentos de medição e NDT. As suas múltiplas aplicações em equipamentos para engenharia, justificam alguma atenção na compreensão dos princípios de ótica e propriedades que estão na base de funcionamento destas técnicas tais como: polarização, coerência ou interferência. Estes princípios estão na origem da formação do padrão de *speckle* e na formação das franjas que possibilitam a medição de grandezas importantes nas técnicas de deteção não destrutiva.

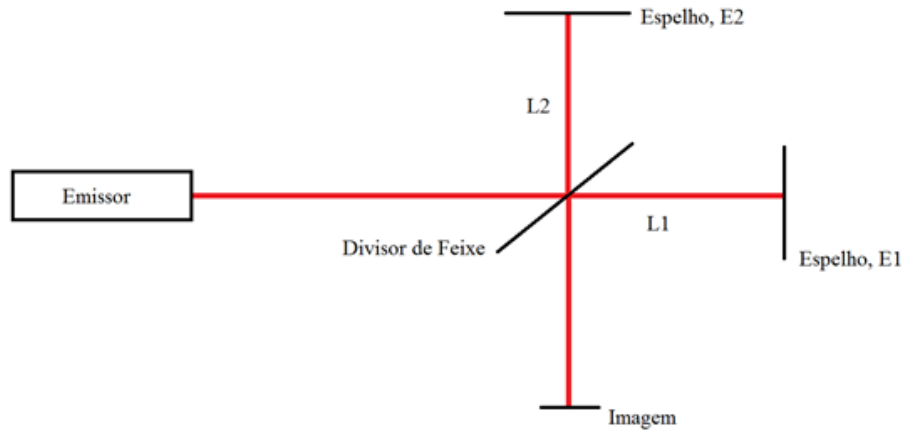


Figura 3.1 – Esquema do interferômetro de Michelson.

O interferômetro consiste essencialmente num emissor de luz coerente e polarizada, normalmente um laser, que emite um feixe que irá incidir sobre um divisor de feixe. O divisor de feixe permite que 50% da intensidade do feixe siga em frente, para gerar o feixe que incide em E1 e o remanescente 50% do feixe inicial é defletido  $90^\circ$ , para produzir o feixe que incide em E2. Os espelhos refletem o feixe de volta para o divisor, onde ocorre a combinação e interferência entre os dois feixes, o feixe proveniente de E1 é refletido no divisor enquanto o feixe proveniente de E2 atravessa o divisor, juntando-se, assim, os dois feixes sendo formada a imagem. Os espelhos têm movimento relativo, E1 pode ser rodado e E2 pode ser transladado, variando o comprimento L2.

Quando os dois espelhos estão perfeitamente perpendiculares as duas frentes de onda serão paralelas e não serão visíveis franjas. Se E1 for rodado, na imagem, para além do padrão de *speckle*, aparecerão franjas devido à interferência. O número ou largura das franjas, que aparecem na imagem, de que se mostra um exemplo na figura 3.2, dependem da rotação relativa entre E1 e E2.

Transladando E2, aumentando ou diminuindo o comprimento L2, verifica-se que as franjas se deslocam na direção paralela ao seu comprimento.

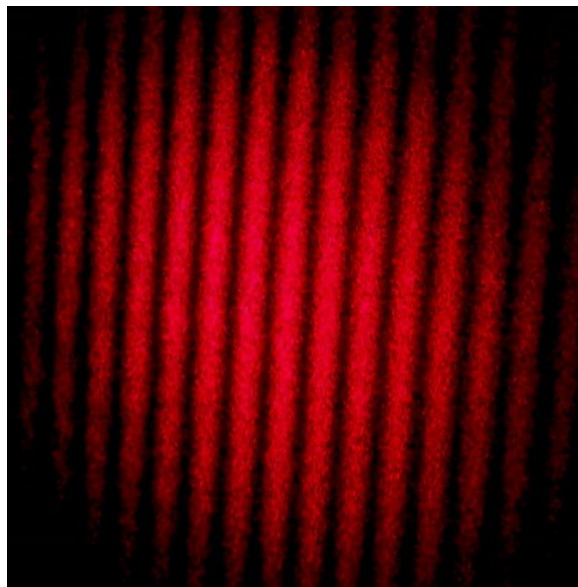


Figura 3.2 – Franjas de interferência obtidas com interferômetro de Michelson.



### 3.1 O interferómetro de Michelson

O princípio do interferómetro de Michelson é amplamente utilizado nas medições com técnicas de interferometria ótica tais como são o ESPI e a *Shearography*. Estas técnicas recorrem ao interferómetro para gravar e medir as variações da fase da luz no padrão de *speckle* que estão diretamente relacionadas com as grandezas que se pretende avaliar.

O princípio básico do ESPI consiste em dividir um feixe Laser num feixe de referência, que é diretamente enviado para o interferómetro, e num feixe objeto que ilumina a superfície em estudo. Quando a superfície se deforma altera o percurso ótico do feixe objeto, enquanto o percurso do feixe de referência se mantém fixo. Processando as imagens de dois estados de deformação diferentes obtém-se um padrão que resulta da correlação desses padrões de interferência que está relacionado com os deslocamentos do objeto.

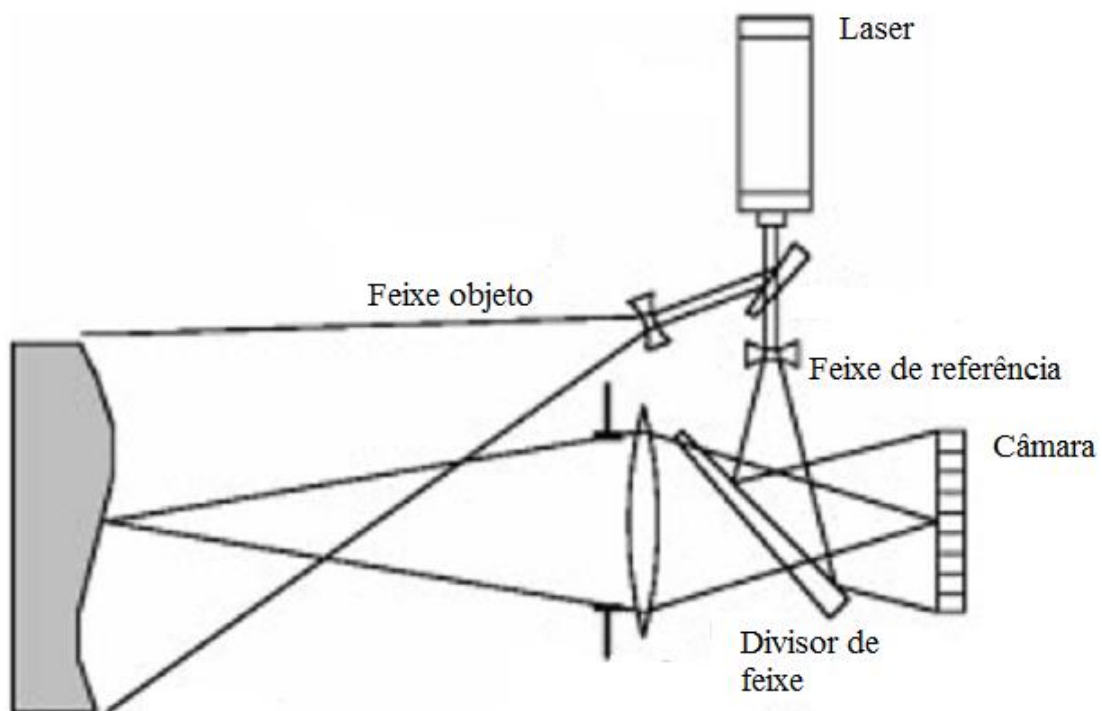


Figura 3.3 – Esquema do interferómetro utilizado num sistema de ESPI.

Na variante designada por *shearography* elimina-se a necessidade de gerar o feixe de referência fora do interferómetro. Nesta montagem o feixe laser é utilizado para iluminar o objeto e é o feixe difundido pela superfície que é dividido dentro do interferómetro. A eliminação do feixe de referência e o facto da *shearography* medir as variações de deslocamentos, faz com que a *shearography* seja menos sensível a movimentos de corpo rígido. Trata-se pois de uma técnica que utiliza uma montagem mais estável e, por isso, mais adequada para a deteção de defeitos em estaleiro.

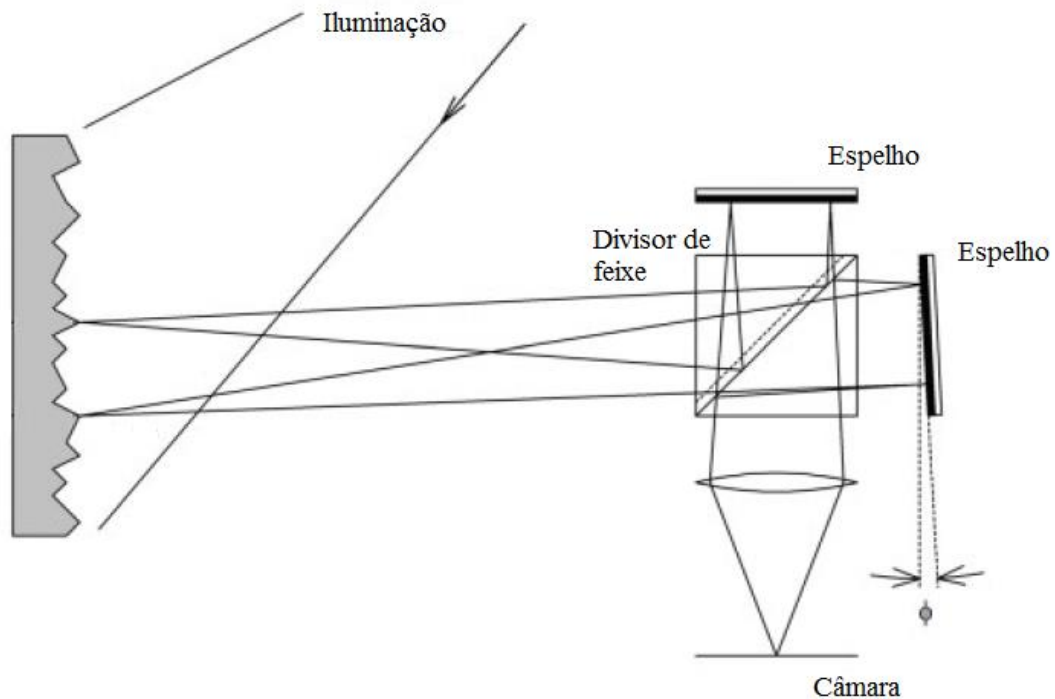


Figura 3.4 – Esquema da montagem ótica utilizada num sistema de *shearography* baseado no interferómetro de Michelson.

### 3.2 Medição deslocamento e gradientes no plano e fora do plano, vetor sensibilidade.

As configurações apresentadas são adequadas à medição de fenómenos estáticos e são sensíveis a deslocamentos fora do plano. No entanto, existem outras configurações que permitem fazer medições com sensibilidade orientada noutras direções ou ainda vocacionadas para avaliar fenómenos dinâmicos. As configurações para medição no plano recorrem, tipicamente, a uma fonte de radiação e uma câmara. Na Figura 3.5 está esquematicamente representada a configuração com iluminação simples em que o vetor sensibilidade está orientado segundo a bissetriz das direções definidas pela iluminação e observação.

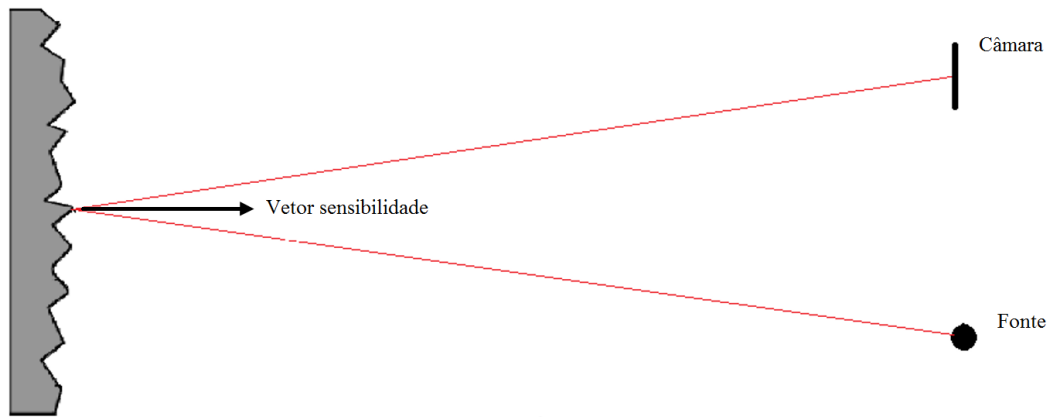


Figura 3.5 – Esquema de montagem com o vetor sensibilidade fora do plano.

Outras configurações recorrem a várias fontes de iluminação ou várias câmaras para alterar a sensibilidade da medição. Por exemplo, recorrendo a duas fontes posicionadas simetricamente em relação à câmara que faz o registo é possível obter-se sensibilidade a deslocamentos no plano. Na Figura 3.6 está representada a configuração típica para medição no plano, que usa iluminação dupla.

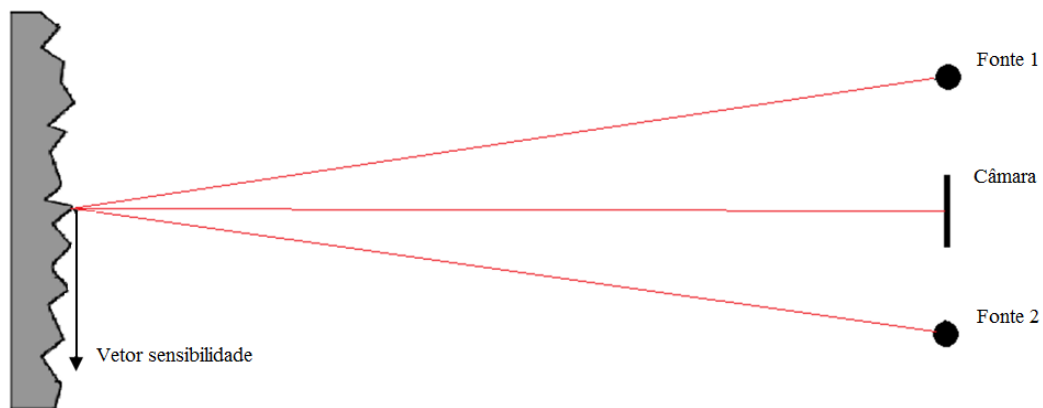


Figura 3.6 – Esquema de montagem para sensibilidade no plano.

Para além destas configurações mais simples é possível, com a combinação de mais fontes de iluminação ou câmaras e com a manipulação de várias imagens, obter-se a matriz completa de deslocamentos ou gradiente de deslocamentos, assim como deformações. [35, 36, 37].

É também possível obter-se sensibilidade de forma. Isto pode ser conseguido variando-se o vetor sensibilidade, mantendo o objeto indeformado [4]. Esta técnica é por vezes utilizada em *contouring*, isto é, medição com o objetivo de obter a forma a 3D.

Noutras configurações é possível avaliar deformações de objetos com superfícies curvas, sendo possível obter-se resultados, a matriz de deformações, com sensibilidade à forma do objeto, ou seja, os resultados apresentados indicam a variação de geometria do objeto e as deformações à superfície [38].

### 3.3 Medição estática e medição dinâmica.

As configurações aqui apresentadas são úteis na avaliação de fenômenos estáticos. No entanto, existe a possibilidade de estudar fenômenos dinâmicos, nomeadamente fenômenos vibratórios e transientes. Estas técnicas permitem avaliar objetos a vibrar nos seus modos próprios, permitindo a análise modal do objeto, ou também medir o comportamento resultante de excitações impulsivas. Estas técnicas tem aplicação, para além da análise modal, a análise de propagação de ondas ou a inspeção não destrutiva de defeitos [4, 37, 39, 40].

O ESPI e a *shearography* para análise dinâmica podem ser operadas em vários modos de funcionamento, por exemplo: o *time-averaging*, também designado tempo médio ou média temporal, iluminação estroboscópica e iluminação pulsada, com destaque para a dupla exposição [4].

## 4. Caracterização da luz

A utilização das técnicas de imagem como as que foram descritas anteriormente pressupõem a propagação de radiação eletromagnética na banda da radiação visível. Nestas técnicas é a luz o veículo utilizado para transportar a informação referente ao comportamento do objeto até à superfície fotossensível do detetor. Para melhor compreender estes fenómenos será necessário conhecer o modelo que caracteriza o fenómeno luminoso.

A luz é uma onda eletromagnética transversal caracterizada pela variação temporal de campo elétrico e magnético. A sua natureza eletromagnética é conhecida desde do século XIX devido ao trabalho de J.C. Maxwell [22].

Nota: Toda a formulação, não referenciada especificamente, exposta neste capítulo foi desenvolvida a partir de [22].

### 4.1 A Luz, propagação de ondas

Com as famosas equações de Maxwell, que descrevem a teoria eletromagnética, é possível caracterizar a natureza ondulatória da luz. Uma onda eletromagnética caracteriza-se pela propagação de um campo elétrico e de um campo magnético perpendiculares que variam sinusoidalmente em fase. Como na maioria dos fenómenos óticos importantes em interferometria é o campo elétrico que sofre alterações devido a interação entre frentes de onda, pode omitir-se o campo magnético das equações que descrevem os fenómenos.

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad 4.1$$

Em que E é a intensidade de campo elétrico,  $\nabla$  o operador de Laplace e c a velocidade da luz no vácuo, detalhando cada um destes termos obtém-se;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad 4.2$$

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \quad 4.3$$

Ondas transversais vibram perpendicularmente à direção de propagação e, portanto, devem ser descritas em notação vetorial. A onda pode vibrar horizontalmente, verticalmente ou numa combinação dos dois. À direção de vibração da onda designa-se por polarização.

Pode considerar-se que uma onda possa vibra num plano definido, este plano será designado por plano de polarização. Para uma onda polarizada num plano que se propaga na direção  $z$  pode simplificar-se a equação para a forma:

$$\frac{\partial E}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad 4.4$$

Que, por sua vez, pode ser escrita na forma trigonométrica, apoiada pela teoria de Fourier que afirma que uma onda pode ser caracterizada pela soma de funções trigonométricas. Considerando uma onda monocromática, com uma só frequência.

$$E(z, t) = E_0 \cos(kz - \omega t) \quad 4.5$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad 4.6$$

$$\omega = 2\pi f \quad 4.7$$

Em que  $E_0$  é a amplitude real da onda e o termo  $(kz - \omega t)$  expressa a fase da onda,  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $\omega$  é a frequência angular e  $f$  a frequência.

A utilização de funções trigonométricas origina cálculos complexos, por isso é comum usar-se a notação exponencial complexa que permite separar a dependência temporal da dependência espacial. As funções trigonométricas relacionam-se com a forma exponencial complexa através da fórmula de Euler.

$$e^{ia} = \cos(a) + i \sin(a) \quad 4.8$$

Em que  $i = \sqrt{-1}$  é a unidade imaginária.

Assim a equação da onda pode ser escrita como.

$$E(z, t) = \frac{1}{2} E_0 e^{i(kz - \omega t + \varphi)} \quad 4.9$$

Em que  $\varphi$  é o ângulo de fase da onda.

Uma frente de onda define-se como a superfície na qual a fase é constante, que em meios de isotropia ótica também tem uma amplitude constante. As frentes de onda são sempre normais à direção de propagação da onda. Uma frente de onda diz-se plana se a fase for constante para todos os planos ortogonais à direção de propagação da onda. A equação de uma frente de onda plana pode ser escrita como:

$$E(r, t) = E_0 e^{i(kr - \omega t + \varphi)} \quad 4.10$$

Em que  $k = (k_x + k_y + k_z)$  é o vetor de onda e  $r = (r_x + r_y + r_z)$  o vetor espacial. Como a equação de um plano no espaço tridimensional é:

$$kr = \text{Const.} \quad 4.11$$

A Eq. 4.10 descreve a dependência temporal de uma onda plana harmónica a propagar-se na direção do vetor de onda  $k$ .

O único parâmetro da luz que é diretamente acessível a um sensor, por exemplo o olho ou um CCD, etc. é a intensidade de luz, a frequência/comprimento de onda pode ser percebida através da cor. A intensidade de luz é definida como o fluxo de energia incidente por tempo numa área unitária perpendicular ao fluxo. A intensidade de uma onda estacionária, amplitude e frequência constante, pode ser escrita como:

$$I(r) = \langle E(r, t) E^*(r, t) \rangle = \lim_{T_m \rightarrow \infty} \frac{1}{T_m} \int_{-T_m/2}^{T_m/2} E(r, t') E^*(r, t') dt' \quad 4.12$$

Em que  $*$  representa o complexo conjugado e  $T_m$  o tempo de medição.

Do ponto de vista prático como não existe nenhum sensor que possa adquirir à frequência da luz esta é normalmente integrada durante o tempo de medição  $T_m$ , já que a intensidade instantânea não é possível de ser medida.

Se:

$$T_m \gg \frac{2\pi}{\omega} \quad 4.13$$

Então, omitindo as constantes de proporcionalidade, obter-se-á:

$$I = E_0 E_0^* = |E_0|^2 \quad 4.14$$

## 4.2 Interferência e coerência

A interferência da luz é o princípio físico utilizado nas técnicas interferométricas. A interferência ocorre quando duas ou mais frentes de onda de luz coerente são sobrepostas. O princípio da coerência é essencial para que ocorra interferência, a coerência pode ser espacial ou temporal. Um exemplo de uma fonte de radiação coerente é um laser onde esta radiação é obtida por emissão estimulada. A idealização do laser é um feixe de luz monocromática que emite uma onda senoide infinita com uma única frequência constante no tempo. No entanto, isto não passa de uma idealização matemática. De facto, os lasers emitem numa banda de frequências, que embora apertada, faz com que a emissão não seja verdadeiramente

monocromática. Para além disto a emissão não é contínua, na verdade as fontes laser emitem em trens de onda. Apesar disto, a aproximação matemática da idealização é perfeitamente válida na caracterização de fenómenos em interferometria.

A interferência quando duas frentes de onda coerentes são sobrepostas pode ocorrer entre dois limites; interferência construtiva ou em fase, interferência destrutiva ou em oposição de fase. Na interferência construtiva de duas frentes de onda as amplitudes somam-se. Na interferência destrutiva as amplitudes são simétricas e anulam-se. Quando se observa um padrão de franjas de interferência podem ver-se franjas brilhantes e franjas escuras, ausência de luz, estas são resultado respetivamente de interferência construtiva e destrutiva.

Considerando o caso da interferência entre duas frentes de ondas coerentes de igual polarização, frequência e amplitude:

$$E_1(r, t) = E_0 e^{i(k_1 r - \omega t + \varphi_1)} \quad 4.15$$

$$E_2(r, t) = E_0 e^{i(k_2 r - \omega t + \varphi_2)} \quad 4.16$$

Em que  $k_1$  e  $k_2$  são a direção de propagação e  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  a fase de  $E_1$  e  $E_2$  respetivamente.

Definindo  $\theta$  como o ângulo entre os vetores  $k_1$  e  $k_2$ , como ambos tem a mesma norma, então:

$$|k'| = \left| \frac{k_1 + k_2}{2} \right| \quad 4.17$$

$$|k''| = \left| \frac{k_1 - k_2}{2} \right| = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad 4.18$$

$$\varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \quad 4.19$$

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \quad 4.20$$

A onda resultante de interferência será:

$$\begin{aligned} (E_1 + E_2)(r, t) &= E_0 e^{i(k_1 r - \omega t + \varphi_1)} + E_0 e^{i(k_2 r - \omega t + \varphi_2)} \\ &= 2E_0 e^{i(k' r - \omega t + \varphi)} \cos(k'' r + \Delta\varphi) \end{aligned} \quad 4.21$$

E a intensidade da onda resultante de interferência:

$$I(r) = (E_1 E_2)(E_1 E_2)^* = 4E^2 \cos^2(k'' r + \Delta\varphi) \quad 4.22$$



Desta forma podem encontra-se os locais de intensidade máxima e mínima:

A intensidade máxima ocorre para os pontos onde:

$$\cos^2(k''r + \Delta\varphi) = 1 \quad 4.23$$

$$k''r + \Delta\varphi = n\pi \quad n \in Z \quad 4.24$$

Nestes locais as ondas estão em fase e ocorre interferência construtiva.

A intensidade mínima ocorre para os pontos onde:

$$\cos^2(k''r + \Delta\varphi) = 0 \quad 4.25$$

$$k''r + \Delta\varphi = (2n + 1) \frac{\pi}{2} \quad n \in Z \quad 4.26$$

Nestes locais as ondas estão em oposição de fase e ocorre interferência destrutiva.

As expressões mostram que o padrão de interferência é independente do tempo sendo o resultado da sobreposição de duas ondas que se propagam no tempo de forma coerente um padrão espacial de distribuição de intensidade.

A visibilidade ou contraste do padrão de interferência é definido como:

$$V = \frac{I_{máx} - I_{mín}}{I_{máx} + I_{mín}} \quad 4.27$$

A coerência está diretamente relacionada com a capacidade das ondas interferirem. A coerência descreve o grau de correlação entre ondas individuais ou no caso das técnicas interferométricas, em que é comum usar-se uma única fonte, o grau de autocorrelação [22].

A idealização de uma fonte laser afirma que a radiação é emitida numa frequência única e bem definida. No entanto, existem sempre pequenas variações, na ordem de  $10^{15}$  Hz, e algumas pequenas flutuações na amplitude [41]. Por isso considera-se que um laser emite em trens de onda que mantem a sua individualidade.

A coerência pode ser dividida em coerência temporal e coerência espacial. A coerência temporal descreve a auto correlação de onda em diferentes instantes de tempo, enquanto a coerência espacial é descrita pela autocorrelação de diferentes trens de uma onda.

Simplificando, existem duas grandezas relevantes quando se analisa o grau de coerência de uma fonte de luz para uso em técnicas interferométricas: o comprimento e o tempo de coerência. Estas grandezas estão relacionadas e dependem diretamente da largura de banda, gama de frequências em que a radiação é emitida, de acordo com a seguinte expressão;

$$\Delta\omega \cong \frac{1}{\Delta\tau_c} \quad 4.28$$

$$\Delta l_c = c\Delta t_c \quad 4.29$$

Em que  $\Delta\omega$  é a largura de banda,  $\Delta\tau_c$  é o tempo de coerência e  $\Delta l_c$  é o comprimento de coerência.

### 4.3 Propriedades do *speckle*

O *speckle* é um fenômeno ótico que ocorre quando uma superfície rugosa ou refletora difusa é iluminada com luz coerente. Este fenômeno foi descoberto com o surgimento do primeiro laser hélio-néon (HeNe), em 1960 quando se verificou que ao iluminar-se uma superfície com uma luz de elevada coerência esta ficava com uma aparência granular, que passou a ser designada por *speckle*. Inicialmente este fenômeno foi considerado indesejável, pois introduzia ruído no holograma. Contudo, mais tarde, percebeu-se que o *speckle* poderia ser utilizado para metrologia de grandezas físicas pois dependia das características da superfície que o gerava. Atualmente as técnicas interferométricas recorrem ao *speckle* para a medição de algumas grandezas, tais como: deslocamento, no ESPI, ou gradientes de deslocamentos no caso da *shearography*.

É importante referir que tipicamente as rugosidades de superfícies são pelo menos da ordem do comprimento de onda da radiação do espectro visível, [400; 750] nm [42].

O fenômeno acontece porque quando uma superfície refletora é iluminada por luz coerente as micro superfícies refletem a luz aleatoriamente. Estas reflexões podem ser caracterizadas como uma frente de onda esférica coerente. As diferenças no caminho percorrido pelas frentes de onda difundidas pela superfície geram fenômenos de interferência. O resultado dessas múltiplas interferências é um padrão de *speckle* ou campo *speckle*, que é um conjunto de pontos, claros ou escuros, com distribuição aleatória, resultado de interferência construtiva ou destrutiva.

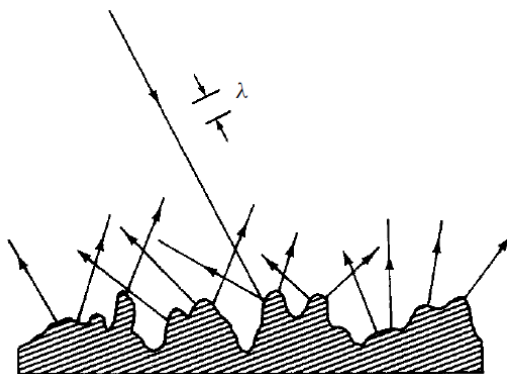


Figura 4.1 – Reflexão aleatória de radiação incidente numa superfície rugosa.

A cada grão de *speckle* corresponde um valor de intensidade luminosa mensurável e também uma fase definida. A aparência do granulado *speckle* é praticamente independente das características do objeto, mas depende fortemente das propriedades óticas do sistema de

observação. O padrão de granulado *speckle* que resulta da iluminação de uma superfície com uma fonte de radiação coerente permanece estacionário, ou seja, cada grão de *speckle* permanece imóvel ao longo do tempo em relação à superfície geradora.

#### 4.4 Caracterização do *speckle*

Segundo o princípio de Huygens quando se ilumina uma superfície rugosa com luz coerente cada ponto da superfície pode ser considerado como uma fonte que emite uma frente de onda esférica secundária. Desta forma o campo elétrico pode ser descrito por:

$$E_n(r_n) = \frac{E'_{0n}}{r_n} e^{i(kr_n + \varphi'_n)} \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad 4.30$$

$$E(B) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{E'_{0n}}{r_n} e^{i(kr_n + \varphi'_n)} \quad 4.31$$

Em que  $r_n$  é a distância do ponto da superfície até ao ponto de observação B e N o número total de pontos da superfície.

Desta forma a aplicação do teorema do limite central da teoria probabilística permite escrever:

$$E_n(r_n) = \frac{1}{\sqrt{N}} |E_{0n}| e^{i\varphi_n} \quad 4.32$$

Em que  $|E_{0n}|/\sqrt{N}$  é a amplitude e  $\varphi$  a fase. Assume-se que estas grandezas são estatisticamente independentes para a mesma onda e para cada onda diferente, assim como se assume que a fase está uniformemente distribuída no intervalo  $[-\pi; \pi]$ .

Assim, a fase obedece a uma distribuição normal do tipo:

$$P_{\varphi}(\varphi)f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & -\pi \leq \varphi < \pi \\ 0, & \varphi < -\pi \text{ ou } \varphi \geq \pi \end{cases} \quad 4.33$$

E a intensidade do padrão de *speckle* obedece a uma distribuição exponencial negativa do tipo

$$P_{\varphi}(\varphi)f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2\sigma^2} e^{-\frac{I}{2\sigma^2}}, & I > 0 \\ 0, & I \leq 0 \end{cases} \quad 4.34$$

Em  $\sigma^2$  é a variância. Da teoria estatística pode considerar-se:

$$\langle I \rangle = 2\sigma^2 \quad 4.35$$

$$\sigma_I^2 = \langle I \rangle^2 \quad 4.36$$

Como o cálculo do valor de contraste pode ser obtido pela expressão:

$$V = \frac{\sigma_I^2}{\langle I \rangle} \quad 4.37$$

Verifica-se que o contraste de um padrão de *speckle* é sempre unitário.

## 4.5 Correlação de dois campos de *speckle*

Quando uma superfície iluminada por um laser sofre uma deformação os pontos do padrão de *speckle* sofrem um deslocamento relacionado com a deformação da superfície. Fisicamente o processo de correlação pode ser percebido como o deslizamento do padrão de *speckle* depois de deformação sobre o padrão antes de deformação. Estes deslocamentos podem ser representados pelos pontos máximos da função de correlação cruzada entre  $I_1(x, y)$  e  $I_2(x, y)$ , respetivamente as intensidades antes do padrão antes e depois de deformação [43].

Matematicamente a função de correlação cruzada é definida multiplicando a intensidade de cada ponto do interferograma 1 pela intensidade de cada ponto do interferograma 2 deslocado por uma distância de atraso,  $\Delta x = x_2 - x_1$  e  $\Delta y = y_2 - y_1$ . Nesta situação considera-se que existe autocorrelação já que se comparam dois sinais provenientes da mesma fonte [43].

A função de autocorrelação de dois padrões de *speckle* antes e após deformação é dada por[43]:

$$R(x_1, y_1; x_2, y_2) = \langle I_1(x_1, y_1); I_1(x_2, y_2) \rangle \quad 4.38$$

Onde  $\langle \dots \rangle$  Representada a média espacial.

## 4.6 Descorrelação do *speckle*

A descorrelação do padrão de interferência é um fator que afeta o contraste das franjas e introduz ruído na medição. A descorrelação pode ser parcial ou total e tem várias causas associadas, por exemplo, translação ou rotação do objeto relativamente ao interferómetro e à fonte de radiação, que são causas comuns de descorrelação. Outro motivo de descorrelação é a própria natureza aleatória do padrão de *speckle* que origina interferência correlativa e não correlativa. Este último fator é difícil de controlar, contudo é possível controlar os outros fatores que induzem descorrelação.

Tipicamente o espaçamento entre franjas é muito superior ao tamanho do *speckle*, mas se este valor se aproximar do tamanho do *speckle* mostra-se que a correlação, e assim o contraste, tendem para zero. De igual modo mostra-se que ocorre descorrelação total se o objeto for transladado lateralmente uma quantidade  $\Delta x$ , determinada por:

$$\Delta x = \frac{1}{m} \frac{f}{a} \lambda \quad 4.39$$

Em que  $m$  é o fator de ampliação  $a$  o diâmetro da abertura,  $\lambda$  o comprimento de onda e  $f$  a distância focal.

## 4.7 Dimensão do *speckle*

Um fator importante na interferometria *speckle* é o tamanho do grão de *speckle*. Nos sistemas digitais são utilizados sensores para o registo de imagem. Muitos dos sistemas interferométricos usam sensores CCD para o registo de imagem. Simplisticamente um CCD é composto várias células fotoelétricas ou píxel (termo que resulta da aglutinação de *picture* com *element*). O número de píxels no CCD determinam a resolução do sistema interferométrico. De forma a obter-se a máxima resolução do sistema deve ajustar-se a dimensão do *speckle* ao tamanho do píxel. Um padrão com grãos de dimensão consideravelmente superior ao tamanho do píxel origina um rácio de píxel por grão elevado, isto significa que as capacidades do CCD não são aproveitadas para a medição, diminuindo a resolução da medição. Por outro lado grãos de dimensão inferior ao tamanho do píxel é também desfavorável. Em cada píxel é encontrado um valor médio de intensidade, se existirem vários grãos num mesmo píxel a informação individual de cada grão nesse píxel será perdida.

O diâmetro do grão de *speckle* é definido como sendo a distribuição média da distância entre regiões de intensidade máxima e mínima.

Teoricamente o fenómeno de *speckle* ocorre devido à interferência de radiação coerente, tal como foi acima descrito. O *speckle* diz-se objetivo quando as suas características dependem apenas da superfície refletora e do plano da imagem onde é observado. Contrariamente em interferometria, em que é usado um sistema de formação de imagem, o *speckle* diz-se subjetivo.

O tamanho médio de grão de *speckle* pode ser encontrado através da função de autocorrelação de intensidade no plano de imagem. No caso de *speckle* subjetivo.

$$R(r) = \langle I \rangle^2 * \left\{ 1 + \left| \frac{2J_1\left(\frac{\pi Dr}{\lambda z}\right)}{\frac{\pi Dr}{\lambda z}} \right| \right\} \quad 4.40$$

Em que  $J_1$  é a função de Bessel de primeira ordem,  $D$  o diâmetro da abertura e  $z$  a distância da lente ao plano de observação.

O tamanho de *speckle* pode ser encontrado através da diferença dos mínimos da função de Bessel.

$$d_s = 1.22 \frac{\lambda z}{D} \quad 4.41$$

Em que  $z$  é a distância da lente ao sensor CCD e  $D$  o diâmetro da abertura.

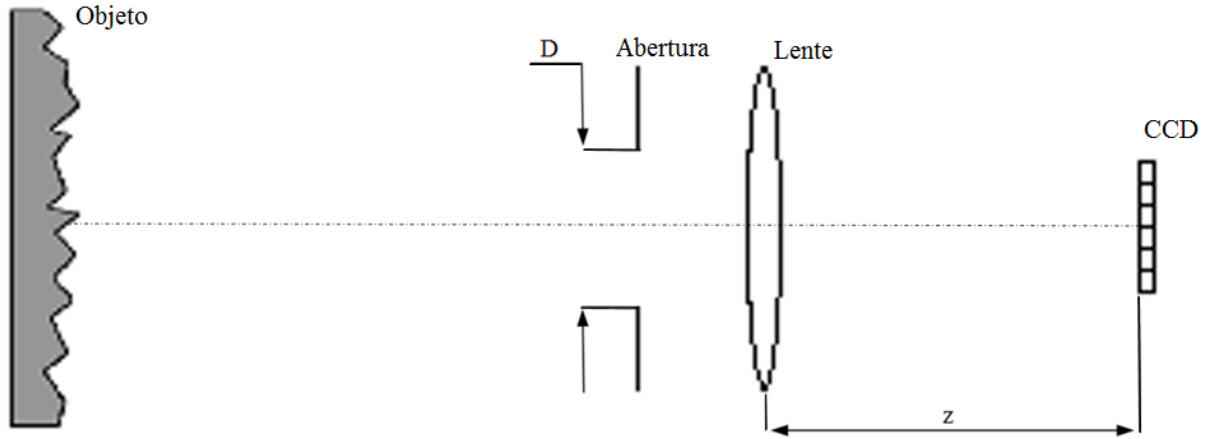


Figura 4.2 – Representação esquemática das grandezas que afetam o tamanho do grão.

Tendo em conta que as lentes usadas para a formação de imagem tem fatores de ampliação o tamanho do *speckle* pode ser, também definido como:

$$d_s = 1.22 (1 + M) \lambda F \quad 4.42$$

Em que  $M$  é o fator de ampliação e  $F$  o *f number* da abertura.

Em que, por sua vez;

$$M = \frac{z}{z+O} \quad 4.43$$

Em que  $z$  é a distância da lente ao objeto e  $O$  a distância da lente ao sensor.

## 4.8 Medição de gradiente de deslocamentos

Considerando o caso do interferómetro de Michelson em que as frentes de onda são combinadas segundo uma direção que pode ser paralela ou ligeiramente inclinada, isto é, interferem a cerca de  $90^\circ$  mais ou menos a inclinação do espelho inclinado para gerar o *shear*. Considerando que o divisor de feixe divide o feixe em duas ondas de igual amplitude, não ocorrendo alteração das restantes características da onda, podemos escrever a expressão das duas frentes de onda que interferem como:

$$E_1(x, y) = E_{01}(x, y) e^{i\varphi(x, y)} \quad 4.44$$

$$E_2(x, y) = E_{02}(x, y) e^{i\varphi(x + \Delta x, y)} \quad 4.45$$

Em que  $\Delta x$  é a distância entre dois pontos na superfície do objeto que devido a rotação do espelho aparecem sobrepostos no plano da imagem. E  $\varphi(x, y)$  e  $\Delta\varphi(x, y)$  são respetivamente a fase da onda direta e da onda de *shear*.

Deste modo a sua interferência pode ser descrita por:

$$\begin{aligned} I_A(x, y) &= |E_1 + E_2|^2 \\ &= I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)} \cos(\psi(x, y)) \end{aligned} \quad 4.46$$

Em que:

$$\psi(x, y) = \varphi(x, y) - \varphi(x + \Delta x, y) \quad 4.47$$

Se o objeto sofrer uma deformação que provoca uma alteração de fase das ondas  $\Delta\varphi(x, y)$  e  $\Delta\varphi(x + \Delta x, y)$ . Então as ondas após deformação são descritas por:

$$E_3(x, y) = E_{01}(x, y)e^{i[\Delta\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y)]} \quad 4.48$$

$$E_4(x, y) = E_{02}(x, y)e^{i[\Delta\varphi(x + \Delta x, y) + \Delta\varphi(x + \Delta x, y)]} \quad 4.49$$

E a interferência após deformação, será:

$$\begin{aligned} I_B(x, y) &= |E_1 + E_2|^2 \\ &= I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)} \cos(\psi(x, y) + \Delta\varphi(x, y) - \Delta\varphi(x + \Delta x, y)) \end{aligned} \quad 4.50$$

Subtraindo pontualmente à intensidade  $I_A$ , antes de deformação,  $I_B$ , após deformação:

$$\begin{aligned} (I_A - I_B) &= \\ &= 4\sqrt{I_1 I_2} \sin \left[ \psi(x, y) + \frac{\Delta\varphi(x, y) - \Delta\varphi(x + \Delta x, y)}{2} \right] \sin \left( \frac{\Delta\varphi(x, y) - \Delta\varphi(x + \Delta x, y)}{2} \right) \end{aligned} \quad 4.51$$

O termo da raiz diz respeito ao brilho de fundo e o primeiro seno é o ruído estocástico de *speckle*. A deformação está expressa no segundo seno da expressão em que se pode relacionar a deformação com o argumento do seno:

$$\begin{aligned}
& \frac{\Delta\varphi(x,y) - \Delta\varphi(x+\Delta x,y)}{2} \\
& \approx \frac{\pi}{\lambda} * [d(x,y) - d(x + \Delta x,y)] \\
& \approx \frac{\partial d(x,y)}{\partial x} \frac{\pi \Delta x}{\lambda}
\end{aligned} \tag{4.52}$$

A expressão mostra que o padrão resultante da subtração de dois padrões de interferência, obtidos com recurso ao interferómetro de Michelson, se relaciona com a derivada do campo de deslocamentos, derivado na mesma direção de rotação do espelho.

## 4.9 Modulação de fase

É possível obter-se um padrão de franjas a partir da Eq. 4.50, contudo, a partir desse padrão é difícil quantificar os valores absolutos das quantidades de metrologia, no caso da *shearography* os gradientes ou derivadas de campos de deslocamentos.

De forma a se poder calcular os valores das derivadas é necessário conhecer a fase nos padrões de interferência. As técnicas utilizadas para o cálculo de fase utilizam a introdução de saltos de fase conhecidos e designam-se por modulação temporal de fase ou salto de fase.

Devido à necessidade de gravar várias imagens em cada estado de deformação e aos requisitos de estabilidade temporal durante o registo esta técnica é ideal em medições estáticas ou de baixa velocidade. No entanto, recorrendo a outras configurações é possível realizar medições dinâmicas. Para o registo com técnicas de modulação de fase a variação de fase pode ser conseguida de várias formas, por exemplo:

- A acoplando um espelho a um elemento piezoelétrico que faça variar o braço do interferómetro;
- Modulação eletro-ótica;
- Mudança do índice de refração do meio de propagação;
- Modulação da fonte laser, variando o comprimento de onda.

Destas a utilização de um elemento piezoelétrico é uma das formas menos dispendiosas e mais fácil de projetar e implementar e que produz bons resultados. A modulação de fase com recurso a um elemento piezoelétrico consiste em fazer variar a distância de um dos espelhos até ao sensor CCD, desta forma varia-se o caminho ótico percorrido pelo feixe, variando-se a fase de cada ponto do padrão de *speckle*.

Dentro destas a utilização de um elemento piezoelétrico é uma forma económica, fácil de projetar e implementar e que produz bons resultados. A modulação de fase com recurso a um elemento piezoelétrico consiste em fazer variar a distância de um dos espelhos até ao sensor CCD, desta forma varia-se o caminho ótico percorrido pelo feixe, variando-se a fase de cada ponto do padrão de *speckle*.

A forma mais simples de se aplicar a técnica de modulação/salto de fase com recurso a um elemento piezoelétrico é aplicando um conjunto de saltos de fase conhecidos e iguais entre si. As Eq. 4.52 e 4.53 descrevem a interferência, antes e após deformação com salto de fase.



$$I_{A,n}(x,y) = I_1(x,y) + I_2(x,y) + 2\sqrt{I_1(x,y)I_2(x,y)} \cos(\psi(x,y) + \varphi_{Rn}) \quad 4.53$$

$$I_{B,n}(x,y) = I_1(x,y) + I_2(x,y) + 2\sqrt{I_1(x,y)I_2(x,y)} \cos(\psi(x,y) + \Delta\varphi(x,y) - \Delta\varphi(x + \Delta x, y) + \varphi_{Rn}) \quad 4.54$$

Em que  $\varphi_{Rn}$  é o salto de fase e  $n$  o número de saltos, ou seja, de imagens utilizadas no cálculo.

A técnica de salto de fase dá origem a um sistema de equações não linear de, no mínimo, três incógnitas, portanto qualquer número de  $n \geq 3$  pode ser usado para determinar a fase do interferograma. Contudo, os problemas de estabilidade limitam a técnica a um máximo de cinco imagens. O método mais comum são quatro imagens desfasadas entre si  $\pi/2$  de  $\lambda$ . Este método garante um bom compromisso entre o número de imagens e o erro introduzido no salto, para além disto o modelo matemático é de simples resolução. Desta forma considerando um sistema de quatro equações com salto de fase de  $\pi/2$ :

$$\psi(x,y) = \Phi_A(x,y) = \arctg\left(\frac{I_{A,4}(x,y) - I_{A,2}(x,y)}{I_{A,1}(x,y) - I_{A,3}(x,y)}\right) \quad 4.55$$

$$\psi(x,y) + \Delta\varphi(x,y) - \Delta\varphi(x + \Delta x, y) = \Phi_B(x,y) = \arctg\left(\frac{I_{B,4}(x,y) - I_{B,2}(x,y)}{I_{B,1}(x,y) - I_{B,3}(x,y)}\right) \quad 4.56$$

$$\varphi(x,y) - \Delta\varphi(x + \Delta x, y) = \arctg\left(\frac{\sin\Phi_{A,4}(x,y) - \sin\Phi_{A,2}(x,y)}{\sin\Phi_{A,1}(x,y) - \sin\Phi_{A,3}(x,y)}\right) \quad 4.57$$

As imagens seguintes, Figura 4.3 e Figura 4.4, ilustram a obtenção de um mapa de fase com recurso à técnica de modulação temporal de fase. Os mapas de fase representados nestas imagens foram obtidos no âmbito de uma tese de doutoramento realizada na FEUP/INEGI [39].

O mapa da Figura 4.3 foi obtido com o sistema de ESPI, através da técnica de modulação temporal de fase, com 4 registos desfasados  $\pi/2$ . O mapa mostra o campo de deslocamentos de uma placa encastrada em todos os bordos e sujeita a uma carga uniforme na direção transversal ao plano.

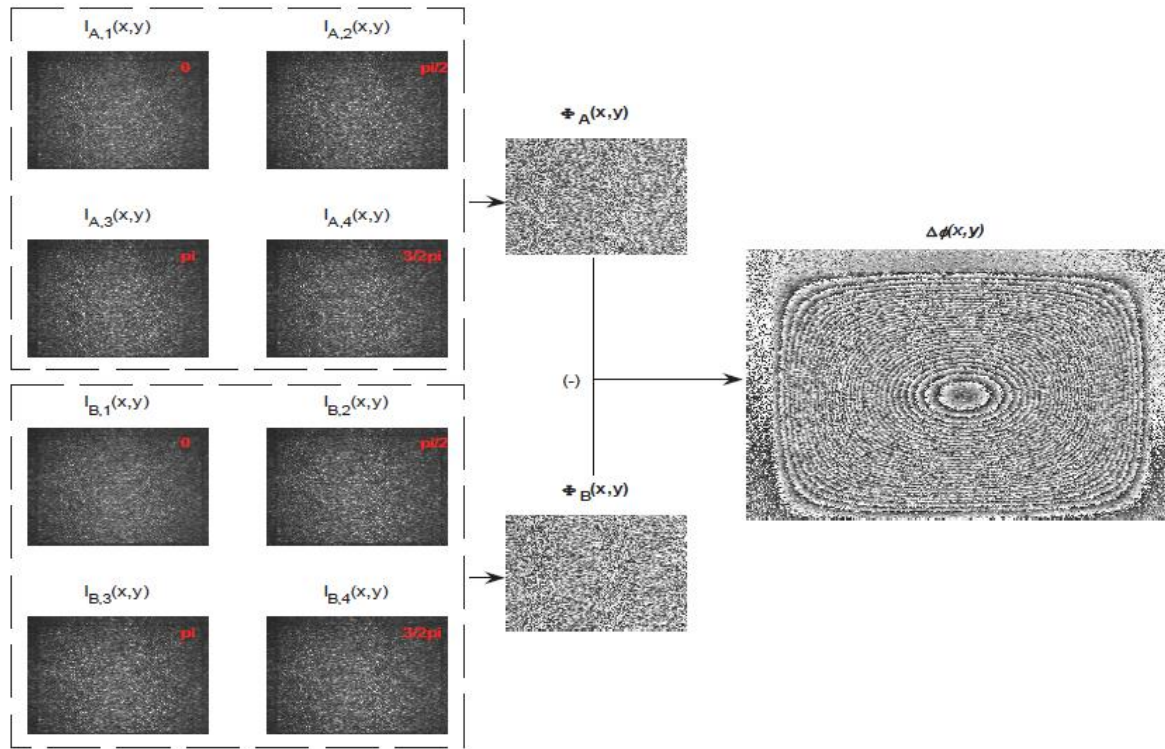


Figura 4.3 – Exemplo de obtenção de um mapa de fase com sistema de ESPI. in “Lopes, Hernâni Miguel Reis. Desenvolvimento de técnicas interferométricas, contínuas e pulsadas, aplicadas à análise do dano em estruturas compósitas, 2007”.

A Figura 4.4 mostra dois mapas obtidos com o sistema de *shearography* e técnica de modulação temporal de fase, com 4 registos desfásados  $\pi/2$ .

Os mapas de fase representam a derivada espacial na direção horizontal e vertical, respetivamente, de uma encastrada em todos os bordos e sujeita a um carregamento uniforme na direção transversal ao plano.

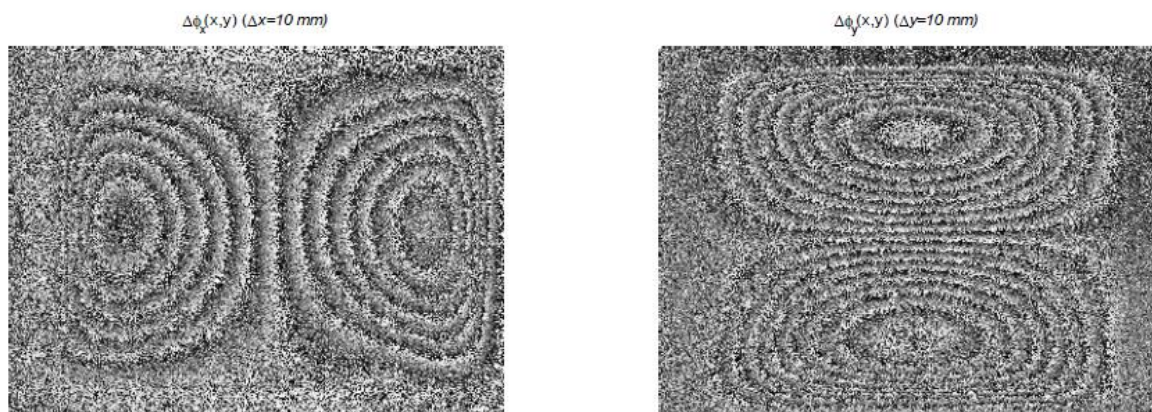


Figura 4.4 – Exemplos de mapas de fase com sistema de *shearography*. in “Lopes, Hernâni Miguel Reis. Desenvolvimento de técnicas interferométricas, contínuas e pulsadas, aplicadas à análise do dano em estruturas compósitas, 2007”.

## 5. Projeto de um sistema *shearography*.

As técnicas interferométricas têm sido estudadas há várias décadas e existem inúmeras soluções de equipamentos disponíveis no mercado. Apesar disto, com a evolução de novas técnicas de fabrico e com a redução dos custos dos componentes óticos, surgem novas oportunidades para desenvolvimento de novos sistemas; mais baratos, práticos e fáceis de aplicar fora de ambiente laboratorial. Devido aos fatores já enumerados e por serem técnicas que envolvem conhecimentos bastante específicos, tais como os princípios mecânicos e óticos envolvidos, a aplicação das técnicas, a programação necessária para adquirir e processar imagens e os conhecimentos de engenharia para interpretação dos resultados estes sistemas tendem a ser bastante dispendiosos quando adquiridos no mercado.

O LOME – laboratório de ótica e mecânica experimental da FEUP/INEGI tem uma vasta experiência na utilização das técnicas óticas. No LOME, quer no âmbito da sua atividade corrente letiva e de prestação de serviços, quer no âmbito de teses e projetos de investigação, foram já desenvolvidos sistemas interferométricos para estudo de diversos problemas, quer dinâmicos, quer estáticos.

Neste capítulo é apresentada uma solução inovadora de um sistema de *shearography* simples e acessível para medição estática de gradientes de deslocamentos. O sistema a desenvolver deve cumprir algumas premissas básicas: ser substancialmente mais barato que os sistemas encontrados no mercado; ser suficientemente resistente a perturbações externas, tais como vibrações ou variações induzidas termicamente; ser fácil de transportar e ser de fácil montagem e desmontagem.

Conquanto se procure uma solução inovadora na perspetiva do projeto, grande parte, senão todos os fundamentos teóricos estão já estudados pelos mais diversos autores e a experiência do LOME é essencial no desenvolvimento do novo sistema, por exemplo, o *software* já desenvolvido para aquisição e processamento de imagem além dos conhecimentos e experiência teóricos e práticos acumulados neste assunto.

A estrutura do projeto divide-se entre a conceção, o fabrico e a posterior validação do sistema.

O aparelho a desenvolver terá como base o interferómetro de Michelson e os restantes componentes necessários para o sistema de *shearography*: sensor CCD; lentes; fonte de luz coerente – LASER; equipamento que suporte o *software* de processamento de imagem.

O projeto consiste numa estrutura de suporte onde serão acoplados todos os componentes. Todos estes componentes, por sua vez, deverão ser selecionados a partir das soluções que já existem no mercado, tais como espelhos, divisor de feixe, lentes, elementos de suporte das lentes, elemento piezoelétrico, suporte que permite rotação de um dos espelhos segundo dois eixos perpendiculares e sensor CCD.

Após a análise de algumas soluções já desenvolvidas e da seleção dos elementos a utilizar no projeto é realizada a conceção e projeto da estrutura onde estes serão depois acoplados

Para além de acomodar os elementos esta estrutura deve cumprir alguns critérios fundamentais necessários ao bom funcionamento do interferómetro. Estando a lidar-se com técnicas de metrologia que são sensíveis a perturbações da ordem do comprimento de onda da radiação utilizada, que no caso de um laser de HeNe ronda os  $0.6\ \mu\text{m}$ , qualquer perturbação desta ordem de grandeza afeta fortemente a medição e pode conduzir à ocorrência de descorrelação. As perturbações podem afetar tanto a peça em estudo como o interferómetro. Uma perturbação que pode causar problemas no interferómetro são as vibrações que provoquem movimento relativo entre o interferómetro e a peça a ser estudada ou podem causar desalinhamentos nos elementos óticos. Outra perturbação que pode afetar de forma grave o interferómetro são variações de temperatura acentuadas que provocam dilatação ou contração térmica além de correntes de convecção.

Tipicamente os equipamentos usados em interferometria, devido à necessidade de grande rigidez, são fabricados em ligas metálicas. O alumínio é o material primordialmente selecionado, por oferecer as características mecânicas adequadas, ser fácil de maquinar, e ter um custo acessível.

Com este projeto pretende-se provar que outros materiais e tecnologias de fabrico podem ser empregues no fabrico deste tipo de equipamentos, tornando-os, deste modo, menos dispendiosos e de fácil fabrico. Particularmente, tenciona-se provar que um equipamento fabricado em polímero apresenta as características necessárias para a aplicação na construção de um sistema de *shearography*. Para além disto a tecnologia de fabrico escolhida é a que comumente se designa por impressão 3D ou fabrico aditivo. Esta tecnologia tem vindo a vulgarizar-se nos últimos anos e encontra-se atualmente no mercado diversos equipamentos, quer para uso industrial, quer para uso doméstico. Trata-se de equipamentos bastante acessíveis, sendo a tendência atual que os custos ainda desçam no futuro.

Estas tecnologias utilizam um filamento de um material polimérico termoplástico que passa por um bocal onde é aquecido e posteriormente depositado em camadas com a geometria adequada. Deste modo é possível construir peças com as mais diversas formas e dimensões, no entanto, algumas formas mais complexas podem ser difíceis de produzir como é o caso, por exemplo, de uma peça com vários furos ou cavidades em diferentes faces. Contudo, isto não apresenta grandes problemas na produção dessas geometrias pois alguns dos materiais tipicamente usados são de fácil maquinagem, ou seja, é possível construir uma peça com as formas globais e posteriormente fazer alterações desejadas, tais como as furações e os cortes necessários.

## 5.1 Simulação de seleção de componentes

A Primeira fase do projeto consiste na seleção dos elementos óticos que integrarão o interferómetro. Deste modo é possível estabelecer os requisitos dimensionais e geométricos do interferómetro necessários à sua conceção. Também é conveniente selecionar nesta fase o sensor CCD, pois este será acoplado ao resto da estrutura e consiste no principal elemento do sistema. Os componentes a selecionar são: espelhos; divisor de feixe; elemento piezoelétrico para construir o modulador de fase; suporte com controlo de rotação; lentes e o sensor CCD para registo dos padrões interferométricos:

Espelhos:

Os requisitos para a seleção dos espelhos relacionam-se com a qualidade de superfície de acordo com um compromisso entre a qualidade de superfície e o seu custo. Assim como a resistência à densidade de energia de radiação e capacidade de dissipação

do calor. A qualidade de superfície afeta a qualidade de imagem e pode ter influência na resistência ao desgaste do espelho.

Como o Laser utilizado nestes ensaios é de fraca potência não há necessidade de escolha de um espelho com grande resistência nem dissipação de energia, no entanto, noutro tipo de montagens e técnicas interferométricas envolvendo laser de maior potência, implicaria a escolha de espelhos com melhores características neste domínio.

A qualidade de superfície, nomeadamente a planeza deve ser sempre inferior ao comprimento de onda da fonte de radiação. Tipicamente, os fabricantes oferecem soluções que vão desde planezas inferiores a  $\lambda$  e de  $\lambda/4$  a  $\lambda/20$  que têm implicações diretas no custo dos elementos. Outro fator a ter em conta é o tipo de substrato e revestimento metálico de superfície que deve ser escolhido de acordo com o comprimento de onda da fonte.

Divisor de feixe:

Para o projeto do interferómetro, por razões de simplicidade construtiva, optou-se pela escolha de um divisor de feixe de geometria cúbica. Conquanto existam outros tipos de geometrias de divisor de feixe este tipo satisfaz as necessidades de projeto e permite uma fixação mais fácil. Os fatores a considerar na seleção do divisor prendem-se com as alterações que estes podem fazer na polarização do feixe. No caso da radiação laser, esta é normalmente emitida segundo ondas polarizadas segundo uma direção definida, portanto, deve ser selecionado um divisor que mantenha a polarização da radiação e a divida em duas ondas de igual amplitude.

Lente:

No caso do sistema projetado, por simplicidade de projeto, optou-se por utilizar uma só lente para formação da imagem. Nesta situação a lente deve ser do tipo biconvexa para formar a imagem no alvo do CCD e deve ser selecionada em função da distância focal que se pretende. O diâmetro da lente condiciona a entrada de luz no entanto maiores diâmetros implicam custos mais elevadas e maiores dimensões para o sistema. Pode, também, optar-se por um revestimento que melhore as propriedades de transmissibilidade da lente e contribuam para um melhor contraste da imagem.

Suporte com controlo de rotação:

O elemento de controlo de rotação é selecionado de acordo com as dimensões do espelho e possibilidade de permitir rotação segundo dois eixos, horizontal e vertical. Trata-se de um elemento que permite criar o *shear* entre as duas imagens por alteração do ângulo de incidência de um dos espelhos. Pretende-se que este posicionador permita controlar facilmente e com precisão a posição do espelho e permita realizar os movimentos sem grandes folgas.

Elemento piezoelétrico:

O elemento piezoelétrico deve ser selecionado em função das suas dimensões e deve possibilitar um deslocamento máximo nunca inferior ao comprimento de onda da radiação utilizada. Este elemento é fundamental para permitir a utilização das técnicas

de cálculo de fase. Este dispositivo deverá permitir realizar saltos de fase de forma controlada e com repetibilidade.

#### Sensor CCD:

Existem atualmente duas tecnologias para os sensores de aquisição de imagem; a tecnologia CCD, *charge coupled device* e a CMOS, *complementary metal oxide semiconductor*. Tipicamente, as aplicações em holografia digital usam sensores CCD, no entanto em anos recentes a tecnologia CMOS tem vindo a ter mais peso no mercado. Apesar deste facto e devido a muitos dos exemplos e aplicações consultados utilizarem sensores CCD com bons resultados, optou-se por um sensor CCD.

Existem diversos fabricantes de câmaras que incluem sensores digitais de imagem, cada um com inúmeras opções no mercado. Os critérios de seleção de um sensor prendem-se com a relação qualidade/preço, já que um sensor pode ir desde cerca de 100 euros até alcançar milhares de euros. Os fatores que influenciam a qualidade da imagem são, por exemplo: a relação sinal/ruído, a taxa de aquisição, a sensibilidade luminosa e a resolução. Outros fatores a considerar são as dimensões finais da câmara de vídeo, a área do sensor, a possibilidade de incorporar um sistema de arrefecimento e o tamanho do píxel. A possibilidade de dispor de um sistema de arrefecimento do sensor, normalmente baseada na utilização do Efeito Peltier é muito importante quando são utilizados tempos de exposição longos já que o aumento da temperatura tende a aumentar o ruído.

#### Laser:

O laser deverá ser selecionado em função do comprimento de onda, potência, polarização e estabilidade do feixe, comprimento de coerência, gama de frequência, etc. Um fator importante a ter em conta será o preço. Historicamente o primeiro laser produzido, utilizava um cristal de rubi e emitia no vermelho com um comprimento de onda de cerca de 650 nm. Atualmente, são produzidos lasers numa variada gama de comprimentos de onda, desde ultra violeta até infra vermelho, passando pelo visível. No entanto, verifica-se que a gama do vermelho, entre 620 a 750 nm, oferece muitas soluções no mercado e aquela que corresponde maior sensibilidade dos sensores. O comprimento de onda afeta diretamente a resolução da medição, mas no âmbito da shearography aplicada ao NDT estes comprimentos de onda oferecem uma resolução mais do que suficiente. A potência do feixe é um fator que influencia diretamente a área de ensaio. O comprimento de coerência em shearography não é um requisito apertado já que devido ao funcionamento do interferómetro de Michelson, são perfeitamente aceitáveis baixos comprimentos de coerência. Para que ocorra interferência a polarização do feixe deverá ser linear.

Para além destes elementos verificou-se mais tarde no projeto a necessidade de integrar outros acessórios, por exemplo: parafusos ou porcas e peças de suporte para a lente e para o diafragma utilizado para controlar a abertura. O diafragma e os tubos e anéis de suporte da lente foram selecionados do catálogo do fabricante Thorlabs®.

Recorrendo-se a catálogos e aos contactos com os representantes e dos fabricantes deste tipo de componentes é possível fazer-se uma estimativa de custos dos elementos a incorporar no interferómetro.

Para os espelhos e prisma recorreu-se ao catálogo da empresa Edmund Optics®, assim;

O espelho selecionado tem as seguintes características: 10 mm de diâmetro, 2 mm espessura, planeza de  $\lambda/4$  para  $\lambda = 632.8$  nm e revestimento de alumínio melhorado;

O divisor de feixe tem as seguintes características: cubo de 10 mm, com planeza  $\lambda/8$  e gama de funcionamento  $430 \text{ nm} < \lambda < 670 \text{ nm}$ , com preservação da polarização em ambos os feixes;

Para a lente do sistema formador de imagem o fabricante selecionado é a Newport Corporation®;

A lente tem as seguintes características: lente biconvexa de diâmetro 25.4 mm e distância focal 62.9 mm;

O componente para a rotação do espelho e o elemento piezoelétrico foram selecionados do catálogo do fabricante Thorlabs®;

O elemento posicionador do espelho com controlo de rotação permite variações de  $\pm 4^\circ$  segundo dois eixos cartesianos;

O elemento piezoelétrico, por sua vez, permite controlo de translação do espelho até 700 nm para uma tensão máxima de 75 V.

O sensor CCD foi selecionado do fabricante Basler AG® e tem uma resolução de 1626x 236, taxa de aquisição de 20 imagens por segundo e tamanho do píxel  $4.4 \times 4.4 \mu\text{m}$ ;

O Laser e a respetiva fonte de potência consideram-se elementos exteriores ao interferómetro. Após pesquisa no mercado estima-se que um laser de HeNe, vendido em conjunto com a fonte de alimentação e com as características necessárias para os ensaios poderá custar entre 200 a 1000 €.

Na Tabela 5.1 discriminam-se os componentes selecionados com a respetiva referência de encomenda e o preço indicado pelo fabricante:

Tabela 5.1 – Discriminação do preço dos componentes.

Componente	Referência	Preço
Espelho (x2)	45-598	42 €
Divisor de feixe	47-121	190 €
Lente	KBX055AR.14 N-BK7	53 €
Elemento de rotação	KMS/M	33.75 €
Piezoelétrico	PA2AD	24.20 €
Sensor CCD	acA1600-20um	Aprox. 1000 €
Diafragma	D25S	42.50 €
Laser + Fonte potência	25-LHP-991	Aprox. 300 €

## 5.2 Seleção de material para fabrico dos componentes mecânicos.

Os polímeros mais comumente usados em impressão 3D são: o PLA, ácido polilático, e o ABS, Acrilonitrila butadieno estireno. O material para impressão é normalmente fornecido sob a forma de filamento enrolado numa bobina, usualmente com diâmetros entre 1 a 2 mm e peso líquido 1kg. Comparando os custos verifica-se que são idênticos para ambos os materiais, no

entanto, existem várias características em que diferem, sendo importante fazer-se um estudo prévio das propriedades destes materiais. As diferenças vão desde as propriedades mecânicas, por exemplo, resistência ou rigidez, coeficiente de expansão térmica, capacidade de resistir ao desgaste ou impacto e o aspeto final da superfície dos componentes, que é, no âmbito do projeto, uma questão meramente estética.

A informação sobre estas questões pode ser encontrada em fóruns, divulgada pelos fabricantes e discutida em artigos. Verifica-se que a informação disponível é congruente e tende a apresentar as mesmas conclusões. Estudadas as questões pertinentes ao projeto verifica-se que o PLA é a melhor escolha. Este material apresenta módulo de elasticidade superior e praticamente não apresenta dilatação térmica significativa. Comparando o PLA com as ligas de alumínio verifica-se que o alumínio apresenta muito maior módulo de elasticidade, mas também maior densidade e maior suscetibilidade à expansão térmica.

No LOME existe uma impressora que foi o equipamento utilizado no projeto. É uma impressora para utilização doméstica que permite imprimir peças de dimensões até 275 x 265 x 240 mm. O custo deste equipamento é de cerca de 2500 € e com ele é possível imprimir peças em PLA e ABS, embora a versão base necessite de algumas melhorias para o uso de ABS.

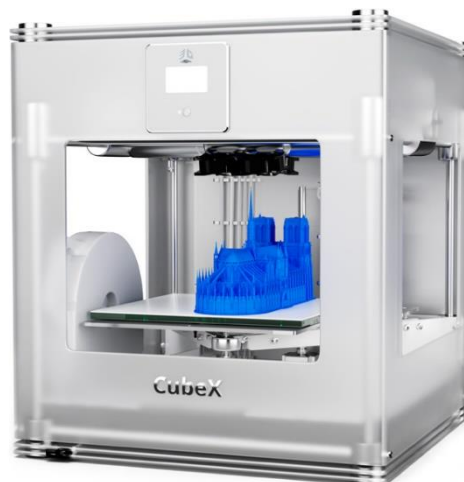


Figura 5.1 – CubeX, impressora 3D para obtenção de formas por fabrico aditivo.

### 5.3 Projeto 3D dos componentes principais.

O projeto do sistema envolveu a conceção, desenho, modelação e fabrico dos componentes. Neste capítulo será apresentado o modelo final e a forma como este foi alcançado. Para a modelização do interferómetro recorreu-se ao *software* de CAD 3D SolidWorks®.

O projeto da estrutura do interferómetro foi desenvolvido com base no interferómetro de Michelson. Depois de selecionados os componentes óticos, propriedades e geometria, concebeu-se a estrutura com a função de manter os componentes na posição correta, de forma estável e protegendo as superfícies óticas. O interferómetro deve permitir o alinhamento dos componentes, ou seja, é necessário variar a inclinação do espelho que gera o *shear*, transladar os espelhos para focar a imagem de ambos os braços, além de ajustar a distância da lente ao CCD.

Os primeiros componentes modelados tiveram geometria e dimensões próximas da solução final, no entanto viriam a ser descartados. Estes componentes serviram como elementos de



aprendizagem para perceber quais os problemas de natureza prática que existiam e serviram como base para o desenvolvimento do interferómetro até ao modelo final.

O modelo inicial consistiu em três componentes: uma caixa; uma tampa e um suporte para o divisor de feixe. A caixa seria depois dividida em duas partes. Embora estes elementos tenham evoluído significativamente e tenham sido acrescentados mais elementos na solução final este modelo inicial manteve-se como a base do projeto do interferómetro.

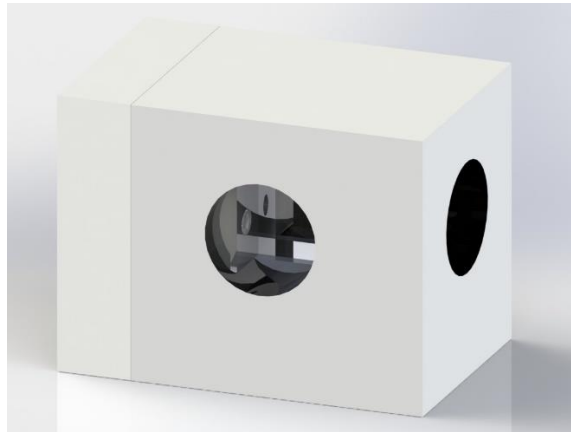


Figura 5.2 – Modelo inicial do interferómetro.

Os primeiros testes permitiram comprovar que, de facto, é possível fabricar peças com boa qualidade, para se construir um interferómetro. Portanto, foram impressas todas as peças necessárias à montagem do interferómetro. Nesta fase testou-se a integridade estrutural do protótipo e a possibilidade de produzir rosca, para, por exemplo, utilizar na fixação de elementos por parafuso. Apesar das peças apresentarem boa qualidade, existiu a necessidade de melhorar o acabamento, principalmente nas faces em contacto ou furos. Para a melhoria do acabamento das peças, testou-se a retificação por abrasivo com auxílio do torno ou com esmeril.

O modelo final do interferómetro evoluiu para uma estrutura com sete componentes: Aos mesmos quatro elementos iniciais, que sofreram modificações foram acrescentadas: uma base, um suporte para o espelho que translada e uma peça que envolve o interferómetro, o CCD e a peça que suporta o espelho.

A tampa do interferómetro deve suportar e manter fixo o elemento de controlo de rotação do espelho ou *shear*, Figura 5.3, e deve permitir ajustar este parâmetro sem necessidade de abrir o interferómetro.



Figura 5.3 – Elemento de controlo de rotação.

A caixa, dividida em duas metades, agrupa o divisor de feixe, suportado pela base do divisor de feixe, a lente, suportada pelo aro da lente, Figura 5.4 e o espelho que translada, no seu suporte.

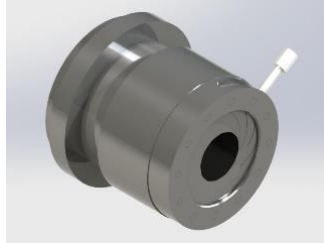


Figura 5.4 – Suporte da lente, anel e diafragma.

A base permite suportar o interferómetro e o CCD, Figura 5.5 na posição correta, assim como garante a fixação correta da tampa.



Figura 5.5 – Câmara de vídeo com sensor de CCD, Basler.

Os espelhos estão fixos aos elementos que os suportam com recurso a colagem com cola de cianoacrilato. O espelho que gera o *shear* está diretamente colado ao suporte com rotação. O espelho que translada está colado ao elemento piezoelétrico que, por sua vez, está colado a um tubo, que permite controlar a translação do espelho e a passagem dos fios de alimentação do elemento piezoelétrico. O elemento que suporta este espelho, Figura 5.6 está modelado de forma a acomodar duas porcas onde se rosca o tubo e desta forma fixa-se o espelho na posição pretendida, sendo possível translada-lo.

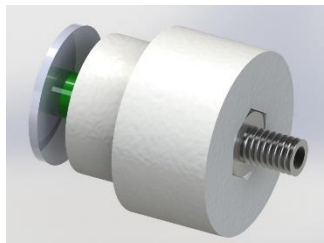


Figura 5.6 – Suporte espelho.

Depois de alguns ajustes alcançou-se o modelo final que oferece estabilidade e rigidez que permitem efetuar ensaios como bons resultados. Na Figura 5.7 mostra-se uma imagem gerada

por *rendering* do interferómetro em perspetiva e na Figura 5.8 mostra-se uma vista em corte, onde se podem ver os vários elementos constituintes do interferómetro. No centro está o divisor de feixe, ladeado pelos espelhos em cima e à esquerda, o CCD à direita e a lente e diafragma em baixo.

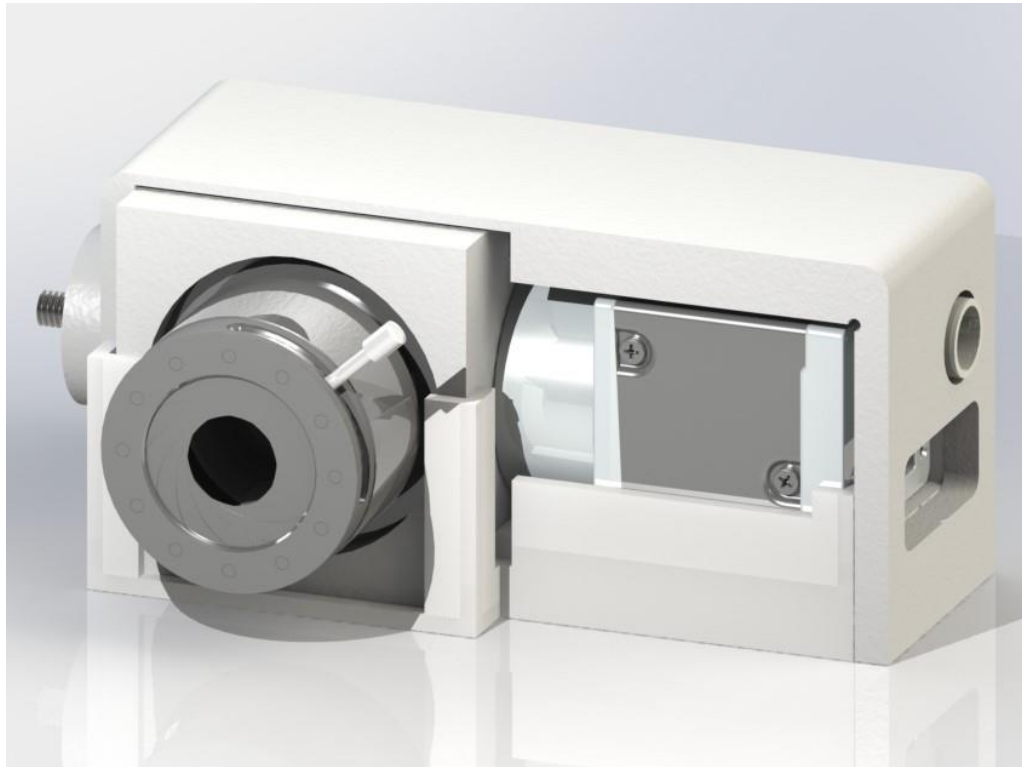


Figura 5.7 – Imagem obtida por *rendering* do desenho em CAD do interferómetro em perspetiva.

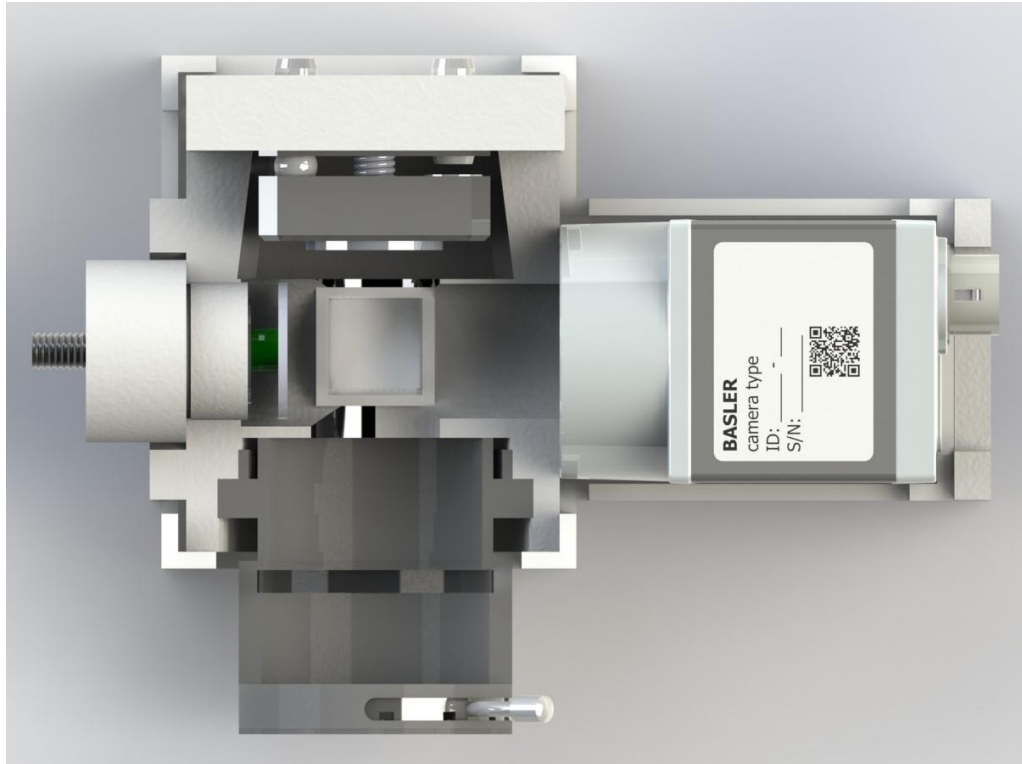


Figura 5.8 – Imagem obtida por *rendering* do modelo final do interferómetro mostrado em corte.

## 5.4 Funcionamento e montagem do interferómetro

Neste subcapítulo será descrito o funcionamento prático do interferómetro. A montagem e regulação dos elementos, como os espelhos ou o diafragma.

O interferómetro é constituído por módulos que encaixam de forma a ficarem fixos. Todos os ajustes necessários podem ser feitos sem necessidade de abrir o interferómetro. O ajuste do *shear*, o ajuste do segundo espelho, o ajuste da distância da lente ao CCD e a variação do diâmetro da abertura podem ser feitos com uma chave hexagonal, para o primeiro, ou manualmente, para todos os outros. Conquanto não seja possível quantificar diretamente nenhum destes ajustes podem ser medidos indiretamente o *shear* e o diâmetro da abertura. O *shear* pode ser medido com recurso a um alvo posicionado no plano do objeto e o diâmetro da abertura pode ser medida com um paquímetro. O interferómetro permite realizar *shear* na direção horizontal e também segundo a direção vertical e ainda uma combinação dos dois.

O *shear* é ajustado através dois parafusos, respetivamente para o *shear* horizontal e vertical. O diâmetro da abertura é ajustado manipulando a patilha do diafragma. A posição do espelho de saltos de fase em relação ao CCD pode ser controlada através de um parafuso.

Nas Figura 5.9 e Figura 5.10 mostra-se o modelo final do interferómetro. Os dois parafusos do lado esquerdo da Figura 5.9 produzem o *shear* do espelho o parafuso do lado direito, por sua vez, controla a posição do outro espelho. O controlo do diâmetro da abertura é feito manipulando a patilha do diafragma fazendo-a deslocar-se ao longo do perímetro.

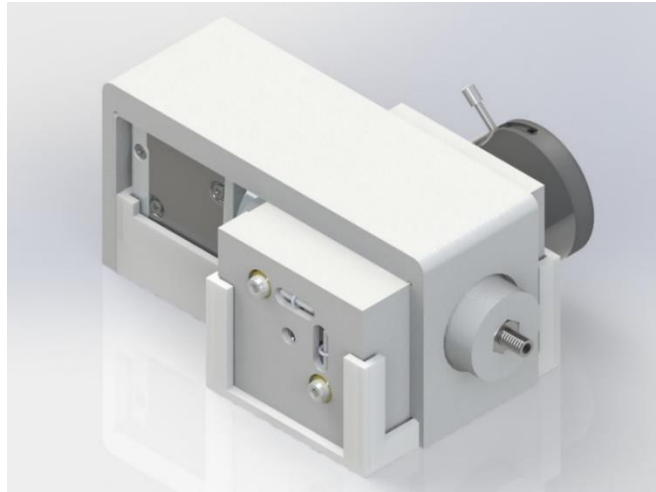


Figura 5.9 – Imagem da geometria final do Interferómetro construído.

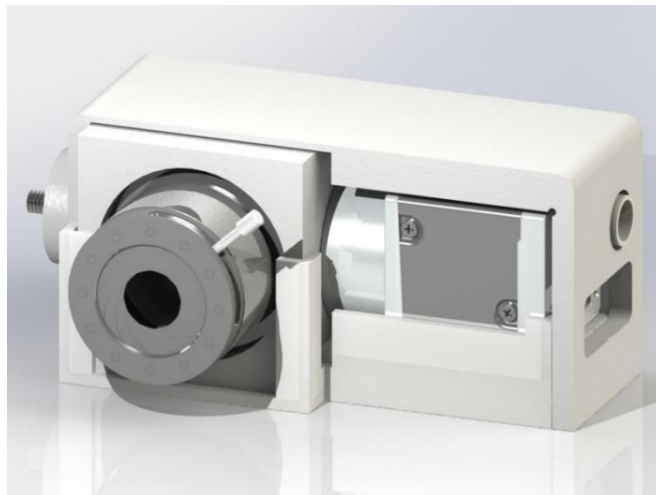


Figura 5.10 – Imagem da geometria final do Interferómetro construído, vista pelo lado da lente de imagem.

Na Figura 5.11 mostra-se uma imagem obtida por *rendering* em vista explodida do modelo do interferómetro. Nesta imagem é possível ver todos os componentes que compõem o interferómetro, com exceção do espelho de *shear* e do elemento piezoelétrico. Na imagem percebe-se o encaixe entre os diferentes elementos, sendo a montagem do interferómetro bastante intuitiva. Os elementos podem encaixar ou estarem fixos por ligação roscada. As duas metades da caixa encaixam uma na outra através de entalhes e ranhuras e a tampa encaixa na caixa da mesma forma. O elemento de controlo de rotação está fixo pela tampa e pela caixa. A tampa tem a sua face interna decalcada com a geometria do elemento de controlo de rotação, que desta forma fica justo. Mais tarde foi adicionado um parafuso.

O suporte do espelho, elemento cilíndrico com variação de diâmetro externo, entra no furo lateral da caixa e fica fixo por aperto.

O espelho está diretamente colado ao transdutor piezoelétrico e por intermédio de um elemento metálico está fixo a um tubo roscado. Este tubo é inserido no suporte do espelho e rosca em duas porcas que são integradas no suporte do espelho. O suporte do divisor de feixe fica, também, fixo por aperto na caixa e o divisor está colado ao suporte.

A lente formadora de imagem está inserida num tubo. O tubo tem variação de diâmetro interno e externo e a lente encosta na zona diâmetro menor e é fixa por um anel que rosca na zona de maior diâmetro. Por sua vez o tubo que segura a lente tem rosca externa na zona de menor diâmetro. O tubo rosca num anel que está fixo à caixa. Este anel tem rosca interna e superfície estriada, as estrias permitem que ele fique fixo à caixa.

O CCD fica suportado na base e encosta à caixa, depois é envolvido pela abraçadeira e desta forma fica fixo. A base e a abraçadeira envolvem a caixa do interferómetro, a tampa e o CCD, mantendo todos os elementos fixos.

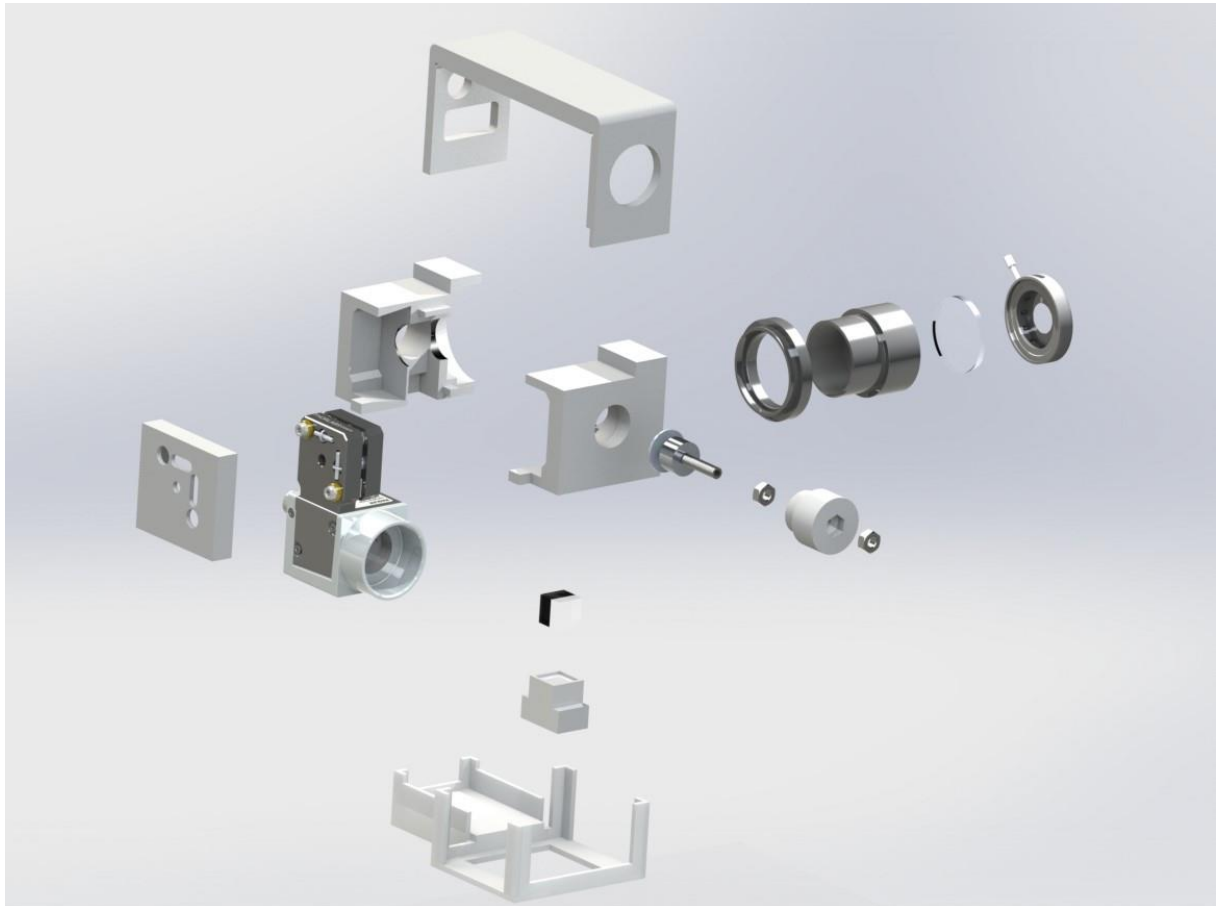


Figura 5.11 - Imagem obtida por *rendering* da vista explodida do interferómetro.

Na Figura 5.12 - Interferómetro desmontado. A Figura 5.12 mostra-se o interferómetro desmontado evidenciando as diversas peças que o constituem.

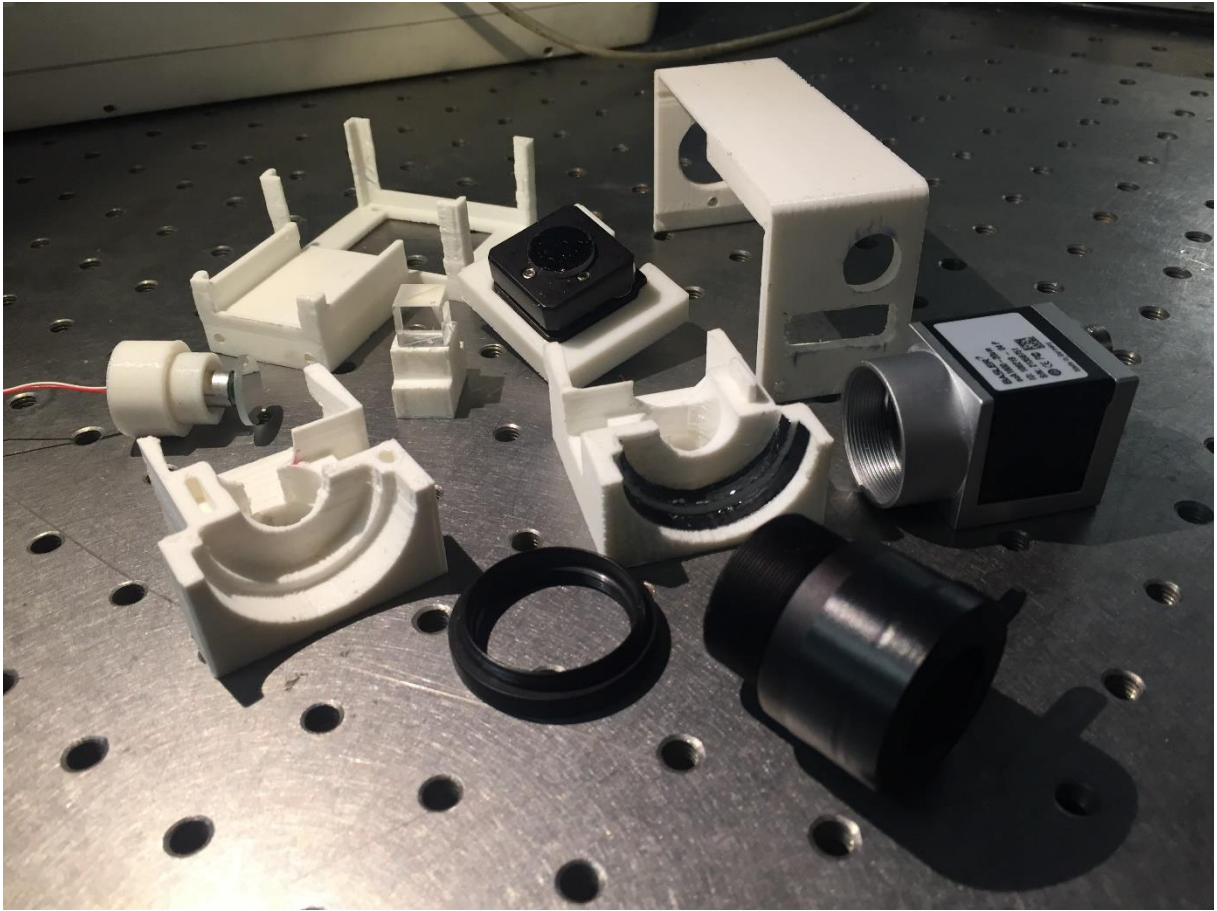


Figura 5.12 - Interferómetro desmontado

## 5.5 Protótipos

Encontrado o correto ajuste dos parâmetros de impressão e descoberto um procedimento célere que permitia a produção de peças de boa qualidade foi possível realizar a produção das peças para o interferómetro. Nesta fase várias peças foram produzidas, desde peças de teste até componentes, que seriam descartados, quer por fraca qualidade de fabrico, quer por terem sido posteriormente alteradas no projeto. Na Figura 5.13 mostram-se alguns exemplos de peças fabricadas.



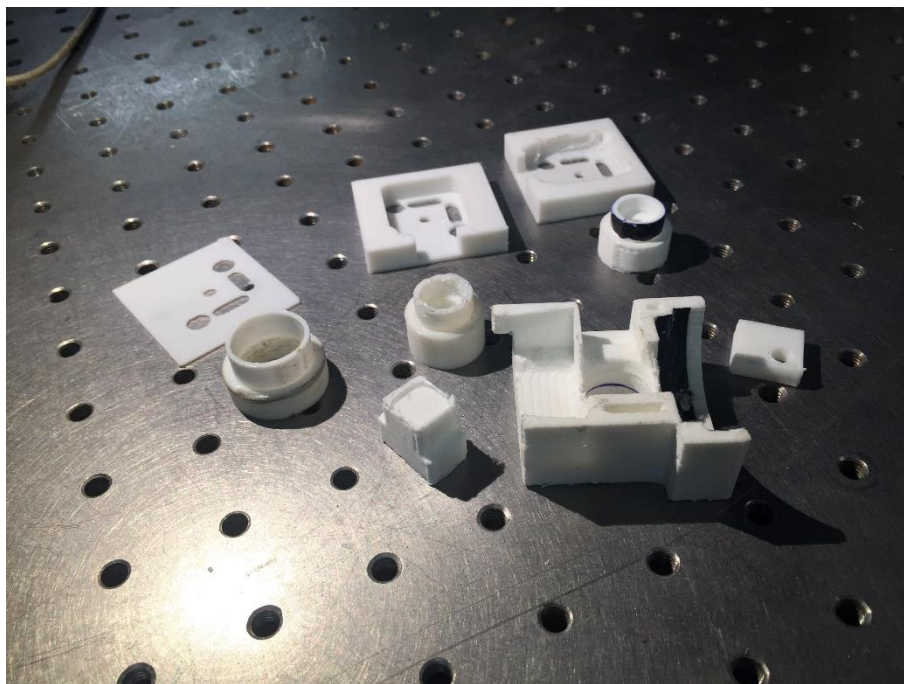


Figura 5.13 - Exemplos de peças fabricadas que foram rejeitadas.

Nesta fase foi desenhado um modelo do interferômetro com forma e dimensões próximas das finais. Foi assim possível avaliar as reais capacidades de construir um interferômetro com recurso a esta impressora.

Depois de projetado o primeiro protótipo, Figura 5.2 do interferômetro foi necessário encontrar a melhor forma de dividir o interferômetro em várias peças, cumprindo as premissas já enunciadas, rigidez, estabilidade, etc., assim como garantir a possibilidade de impressão dessas peças com a qualidade necessária.

Nesta fase procurou-se montar alguns dos componentes óticos do interferômetro, divisor de feixe espelhos, elemento piezoelétrico, assim como o componente que permite a rotação do espelho. Verificou-se que alguns ajustes dimensionais e geométricos eram necessários em alguns componentes do interferômetro. Após esta fase foi necessário fazer alguns ajustes no modelo do interferômetro. Para além dos ajustes devidos aos problemas dimensionais e geométricos, procedeu-se, também, a melhorias no projeto das peças com o objetivo de melhorar a qualidade de impressão. Estas melhorias corresponderam a pequenos ajustes em zonas onde se verificavam ou previam o surgimento de problemas, por exemplo, em zonas da peça com geometria complexa, que resultavam em defeitos de impressão e zonas de maior fragilidade. Algumas alterações para permitir melhor encaixe e alinhamento das peças e componentes do interferômetro, foram também introduzidas e resultaram em maior rigidez e integridade global. Nas Figura 5.14 e Figura 5.15 mostra-se a estrutura principal de um dos interferômetros inicialmente produzidos.



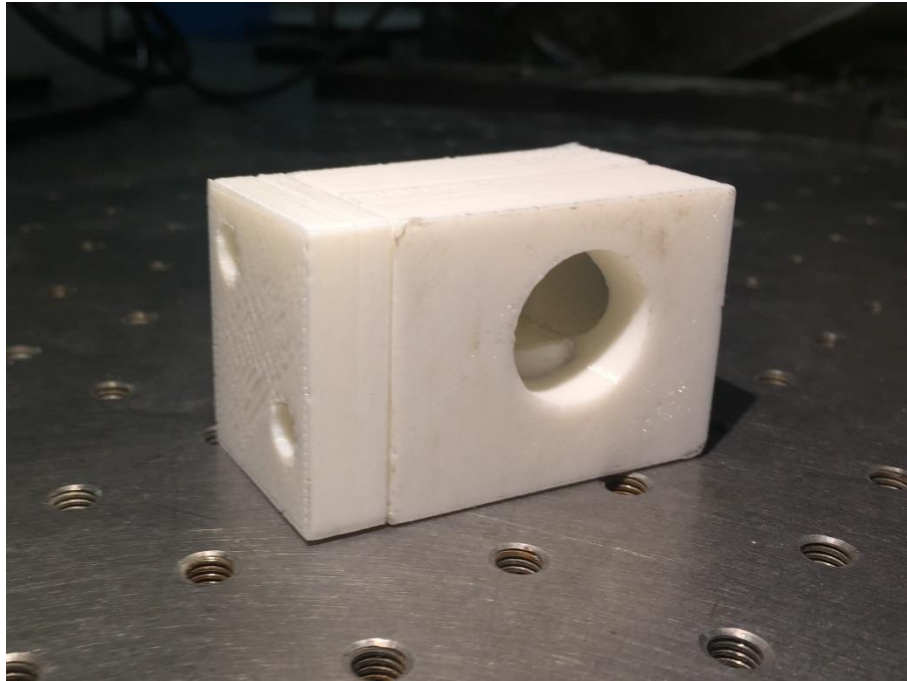


Figura 5.14 - Estrutura principal do interferômetro montada.

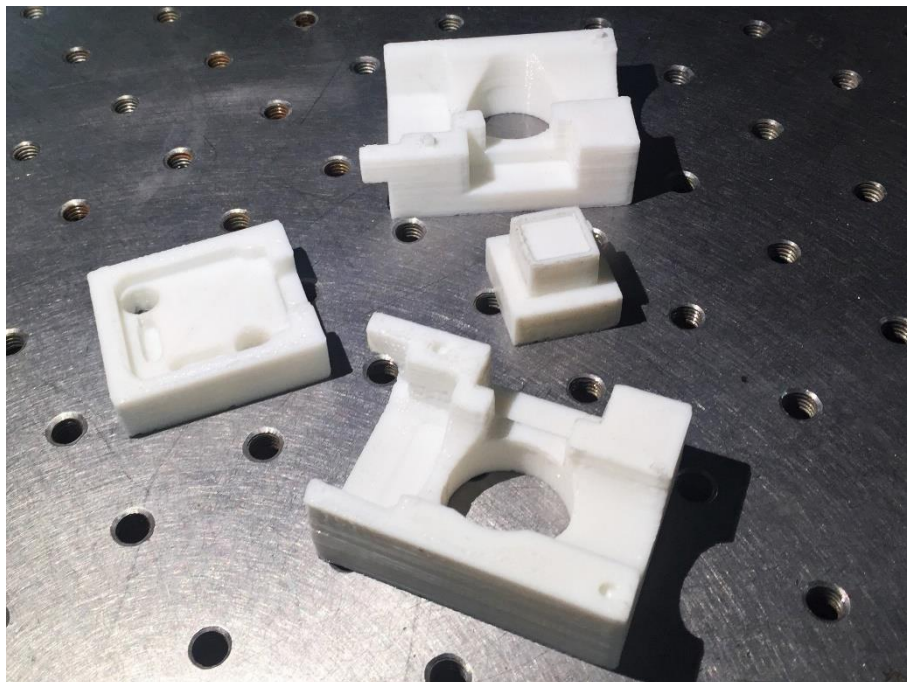


Figura 5.15 - Protótipo do interferômetro desmontado.

Após se alcançar a geometria final do interferômetro foi ainda necessário o projeto e fabrico de alguns componentes adicionais com função de fixação do interferômetro e do sensor CCD. Estas peças mantêm o interferômetro e o CCD corretamente acoplados e garantem a posição correta de todas as peças do interferômetro.

## 5.6 Dificuldades com o fabrico aditivo dos componentes

O processo para imprimir uma peça utilizando uma impressora 3D tem algumas semelhanças com o realizado com uma máquina CNC, trata-se de construir uma geometria 3D por um processo aditivo enquanto na segunda a mesma geometria é obtida por um processo de remoção de material, isto é, subtrativo. Para se fabricar uma peça na CubeX é necessário recorrer a três programas de *software* diferentes, um para modelo 3D, outro destina-se ao controlo dos parâmetros de impressão e geração do ficheiro de impressão e, por fim, um *software* de edição de texto que permite ler e alterar o ficheiro gerado.

O modelo 3D é feito com recurso a um programa de CAD, neste caso o SolidWorks®, que é amplamente utilizado para este fim.

No que concerne à parametrização da impressão e geração do ficheiro recorreu-se a um *software* concebido pela empresa que produz a impressora. No entanto, verificou-se que este não era o mais adequado para o projeto.

Por razões comerciais a empresa dificulta o uso do seu *software* se as bobines não foram as da marca. Tendo em conta que é possível adquirir bobines idênticas com a mesma qualidade noutros fabricantes, o que representa uma poupança de até 75%. Contudo a utilização de bobines de outros fabricantes implica alterações no código do ficheiro de impressão.

Pelo motivo acima enunciado optou-se por procurar outro *software* para a geração do ficheiro de impressão. Foi selecionado o programa *Kisslicer, Keep it simple slicer*, que está disponível em versão *freeware* e é adequado ao uso em qualquer equipamento de impressão 3D. Este *software* permite maior liberdade no controlo dos diversos parâmetros da impressão.

A utilização deste *software* começou por um processo de aprendizagem no controlo dos parâmetros e na identificação do seu significado prático, isto é, como a sua manipulação afeta a qualidade da impressão. Nesta fase recorreu-se a um guia de utilizador que acompanha o *software* e à leitura de fóruns, assim como ao visionamento de vídeos produzidos por entusiastas. Feito este processo começou-se uma fase de testes cujo objetivo foi produzir várias peças, de diferentes dimensões e geometrias, para perceber todas as possibilidades e limitações da impressão com a CubeX. Uma dificuldade surgiu ainda neste percurso pois o ficheiro gerado pelo *kisslicer* deve ser guardado numa *pen drive* para o transferir por ligação USB à impressora. Inicialmente ocorreram vários erros de leitura pois a impressora não reconhecia o ficheiro ou reconhecendo ocorriam erros na leitura do ficheiro que impossibilitavam a impressão. Depois de alguma pesquisa em fóruns foi encontrada uma solução que consiste na utilização de programa que funciona como uma extensão no *kisslicer* original e foi desenhado especialmente para utilizadores da CubeX ou outras impressoras do mesmo fabricante. Este programa funciona como programa de pós processamento que adapta o ficheiro para ser corretamente lido na impressora. De início esta solução revelou-se aceitável e algumas peças de teste começaram a ser produzidas. Assim foi possível o ajuste dos parâmetros de impressão para a otimização da qualidade das peças. Os resultados obtidos foram satisfatórios as peças apresentavam boa rigidez, bom rigor dimensional e geométrico e acabamento satisfatório para as necessidades de utilização. Contudo, quando foram produzidas peças com geometrias mais complexas verificou-se o aparecimento de alguns defeitos. Estes defeitos surgiam em zonas com geometrias complexas e caracterizavam-se por falta de enchimento, ou seja, falta de material que não fora corretamente depositado. Para além do aspeto estético estes defeitos prejudicam estruturalmente as peças, estas ficam menos rígidas e resistentes, assim como a sua funcionalidade. Foi possível, observando a impressão, perceber que a causa do problema de enchimento defeituoso era a velocidade excessiva do bocal. Os ajustes feitos no programa não

atenuaram o problema, por isso foi necessário analisar diretamente o ficheiro de impressão. Este ficheiro corresponde a um conjunto de linhas de comandos, em linguagem G-Code. Para melhor se entender os problemas em causa decidiu-se estudar os fundamentos básicos deste tipo de linguagem, mais concretamente os comandos importantes que determinam os parâmetros de impressão. Após este estudo e analisando os ficheiros percebeu-se que em vários comandos as velocidades eram muito elevadas, era pois necessário alterar esses valores para gamas aceitáveis. Sendo impossível analisar as milhares de linhas do ficheiro a primeira abordagem para minimizar o problema de velocidade excessiva foi a criar um programa que automaticamente encontrasse e corrigisse os comandos com velocidades excessivas. Para isto optou-se por escrever um programa para esta função usando o *software* Matlab®. Neste programa é possível definir quais as velocidades máximas admissíveis e qual o novo valor dessas velocidades, ou seja, todas as velocidades superiores a um valor definido seriam alteradas para uma nova velocidade aceitável. O objetivo seria gerar o ficheiro de impressão no kisslicer e depois usar o programa de correção de velocidades para alterar as velocidades para valores adequados. O programa cumpriu os objetivos. Contudo a alteração de velocidades deu origem a novos problemas na impressão, por exemplo uma deposição excessiva de material que por sua vez gera problemas de fluxo do filamento no bocal, ou arrastamento do material excessivo. Por estes motivos foi necessário encontrar uma solução diferente para o correto ajuste das velocidades.

Nesta fase começou por se comparar os ficheiros gerados no kisslicer antes e depois do pós processamento, nomeadamente quais os comandos que diferiam ou que eram alterados. Isto foi feito com recurso a um editor de texto. Nesta fase era, também, pertinente fazer-se a mesma comparação utilizando o *software* da marca, por isso foram gerados os ficheiros de impressão das mesmas peças nesse software. Após esta análise e por tentativa e erro percebeu-se quais os comandos que impediam a impressora de imprimir sem um cartucho da marca. Conclui-se que era possível alterar dois parâmetros, no Kisslicer que de forma indireta limitavam as velocidades máximas, o que permitiu resolver este problema. Conclui-se, também, que as capacidades do editor de texto são aceitáveis para se fazer as alterações ao ficheiro gerado no Kisslicer sem pós processamento.

Concluída esta análise o procedimento final para impressão das peças foi encontrado. Este consiste em criar o modelo em SolidWorks®, importar o ficheiro para o Kisslicer, gerar o ficheiro para impressão sem pós processamento, no editor de texto fazer as alterações necessárias e por fim guardar o ficheiro na *pen drive* para ser lido na impressora.

## 5.7 Considerações finais de capítulo

O projeto de um sistema de shearography envolve a conceção de um interferómetro e seleção dos respetivos componentes óticos, assim como a programação necessária para a recolha, processamento e *output* de resultados.

Neste capítulo apenas foi apresentado o projeto de um interferómetro com os respetivos componentes.

O sistema tem capacidade para fazer medição estática de gradiente de deslocamentos fora do plano.

Devido à opção de ser usada uma só lente a área de medição é reduzida, comparativamente com as potencialidades que um sistema deste tipo tem. Para aumentar a área de medição seria necessário projetar ou adquirir um sistema ótico diferente. No capítulo 6 este assunto é discutido.

O *software* usado permite a obtenção de imagens em tempo real, assim como a subtração em tempo real. A subtração em tempo real usa duas imagens que resultam numa terceira imagem, que é a imagem visualizada. O utilizador escolhe o momento a partir do qual começa a subtração, neste momento é guardada a imagem que será a referência à qual é subtraído cada imagem proveniente do detetor.

O interferómetro está preparado para modulação temporal de fase através do elemento piezoelétrico. A técnica de salto de fase requer um elevado volume de programação. Seria necessário calibrar o piezoelétrico e aumentar as capacidades de processamento de imagem.

Idealmente o interior do interferómetro devia ser preto mate, de modo a se reduzirem reflexões internas que podem afetar o padrão de interferência.

Para a otimização do projeto do interferómetro poderiam ser introduzidos parafusos que melhorassem a fixação dos componentes.

## 6. Ensaios e resultados

Neste capítulo serão descritos os testes e ensaios realizados com o interferómetro, assim como serão mostrados e discutidos os resultados obtidos. Os ensaios e testes foram feitos a objetos com defeitos conhecidos, quer na sua localização, quer na energia de impacto usada para induzir os defeitos na peça. Os resultados obtidos correspondem a imagens que resultam da interferência entre registos holográficos. Nas imagens será possível perceber-se um padrão de franjas, cujas variações de geometria e densidade podem indiciar a presença de um defeito.

Inicialmente foram efetuados alguns ensaios numa placa plana de compósito de carbono retangular com 100 mm por 150 mm e espessura 4 mm contendo um defeito visível provocado por um impacto de 16 J e dois defeitos de difícil perceção, provocados por impactos de 5 J. Estes primeiros ensaios permitiram verificar a viabilidade e fiabilidade do interferómetro. Nestes ensaios foi possível caracterizar e ajustar os parâmetros de forma a otimizar o processo de ensaio, assim como conhecer quais os parâmetros que originam imagens de melhor qualidade.

Apesar da *shearography* ser uma técnica de medição global e sem contacto pode exigir a necessidade de alguma preparação simples das superfícies, de modo a melhorar a sua refletividade. Isto pode ser conseguido de forma prática, económica e expedita com a aplicação de um pó branco metálico em *spray*. Este pó pode, mais tarde, ser facilmente removido com o auxílio de um pano. O produto utilizado para revelar fendas com líquidos penetrantes é frequentemente utilizado para este efeito dadas as suas características: aplicado em *spray*, volatilização rápida do solvente, cor branca baça e fácil remoção.

Na Figura 6.1 mostra-se a placa utilizada no ensaio, onde é possível perceber-se a existência do defeito de maior energia, sendo que os de menor energia são visualmente impercetíveis. Na imagem é possível observar-se o pó metálico usado para melhorar e uniformizar a refletividade da superfície.



Figura 6.1 – Placa de fibra de carbono com defeitos de impacto e preparação de superfície.

Na primeira etapa do teste foi necessário encontrar a distância ideal do interferómetro ao objeto de ensaio. Neste caso essa distância é a que proporciona a maior área de ensaio possível sem se perder qualidade de imagem, ou seja, sem desfocar ou obter uma área com contornos deficientemente iluminados. Como se pretende construir um interferómetro simples o sistema de lentes utilizado consiste na utilização de apenas uma lente que foca a imagem no CCD. Isto é uma limitação do sistema pois a lente deve ser escolhida em função da geometria do interferómetro, sendo que o fator preponderante é a distância focal da lente, que limita a área máxima que pode ser ensaiada.

Simultaneamente com o estudo acima descrito foi sendo feito o foco dos espelhos de forma a se obter duas imagens, provenientes de cada um dos espelhos, com qualidade equivalente, isto é, mesmo grau de focagem e iluminação muito semelhante. O foco da imagem pode ser feito de duas formas: variando a distância da lente ao CCD, ou variando a distância do espelho ao CCD. Como apenas um dos espelhos pode transladar o procedimento para focar a imagem consistiu em focar-se a imagem relativa ao espelho fixo (espelho que faz o *shear*), para a maior área de ensaio possível. Isto é realizado fazendo variar a distância da lente ao CCD. De seguida, mantendo a lente e a distância do interferómetro ao objeto, é ajustado o espelho que translada de forma a obter uma segunda imagem focada. A distância que proporciona a maior área de ensaio são 410 mm desde a face frontal da caixa do interferómetro até ao objeto sendo, nesta configuração, a área de ensaio são 1120.7 mm<sup>2</sup> equivalentes a 38.6 mm por 29 mm.

Na Figura 6.2 mostra-se a montagem utilizada para os ensaios. Esta montagem foi feita numa mesa anti vibrátil, que permite reduzir o efeito possíveis perturbações externas. A placa está fixa, considera-se encastrada, estando segura à mesa com recurso a peças de fixação de elevada



rigidez, o interferómetro está fixo numa plataforma em que é possível fazer ligeiros ajustes com a utilização de parafusos micrométricos. O Laser de HeNe está posicionado junto do interferómetro e está colocada uma lente de microscópio imediatamente à sua frente. A lente permite abrir o feixe de modo a este iluminar uma área na superfície da placa. Esta montagem oferece um vetor sensibilidade praticamente normal ao plano da superfície da placa.

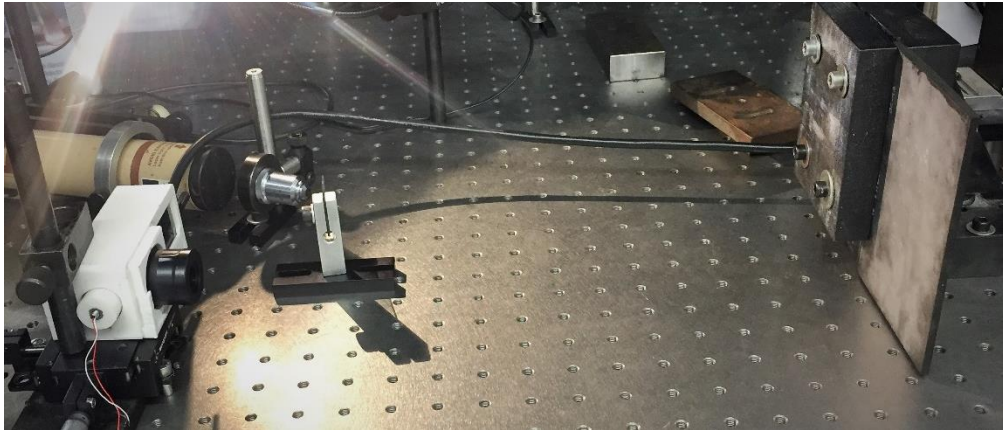


Figura 6.2 – Montagem para ensaios da placa

Na Figura 6.3 mostra-se um pormenor da montagem, em que se pode observar a fonte térmica, uma lâmpada de halogénio de 500 W, utilizada para excitar a placa assim como um alvo ótico usado para focar as imagens e medir o valor de *shear*.

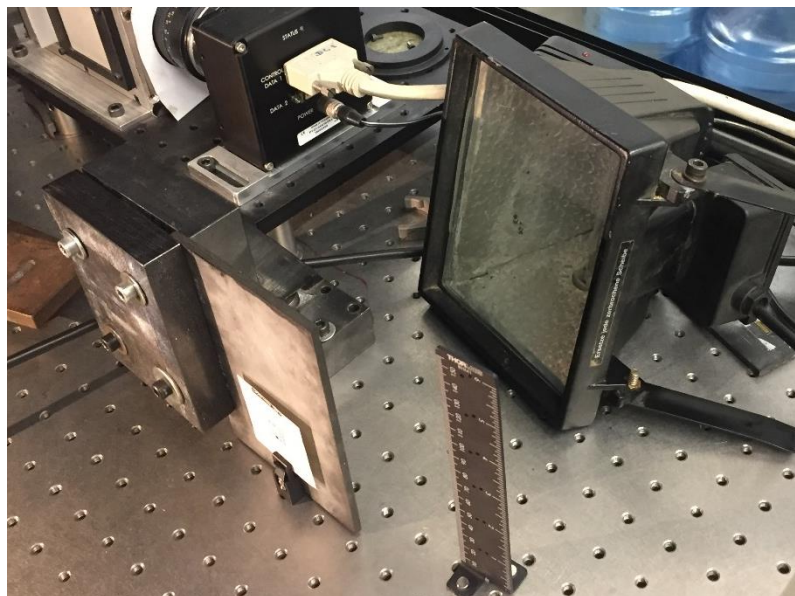


Figura 6.3 – Pormenor da montagem para ensaios da placa

Após esta etapa foram realizados vários ensaios para essa distância máxima em que se variou a o diâmetro da abertura e a inclinação do espelho (*shear*). Desta forma foi possível perceber quais os ajustes dos parâmetros que originam melhores imagens, quer em termos de focagem,

quer em termos de contraste. O *shear* foi medido com recurso a um alvo posicionado em frente à peça em estudo. Os valores de diâmetro de abertura usados foram variados, em saltos constantes, desde a menor abertura que o obturador permite <1mm até à abertura máxima de 18 mm. Também os valores de *shear* foram variados, em saltos constantes.

Na Tabela 6.1 estão descritos os parâmetros de *shear* e diâmetros da abertura usados nos ensaios da placa. A sequência usada é a que se mostra, ou seja, define-se um valor de *shear* e, sem alterar esse valor, varia-se o diâmetro da abertura desde o valor mínimo até ao valor máximo, depois aumenta-se o *shear* e procede-se da mesma forma. Esta sequência é replicada até ao valor máximo de *shear* testado.

Tabela 6.1 - Parâmetros de ensaio da placa

Tabela com parâmetros de ensaio à placa.			
<i>Shear</i> 2.07 mm	Abertura mínima	<i>Shear</i> 18 mm	Abertura mínima
	Abertura 3 mm		Abertura 3 mm
	Abertura 6 mm		Abertura 6 mm
	Abertura 9 mm		Abertura 9 mm
	Abertura 12 mm		Abertura 12 mm
	Abertura 15 mm		Abertura 15 mm
	Abertura máxima		Abertura máxima
<i>Shear</i> 7.4 mm	Abertura mínima	<i>Shear</i> 23.3 mm	Abertura mínima
	Abertura 3 mm		Abertura 3 mm
	Abertura 6 mm		Abertura 6 mm
	Abertura 9 mm		Abertura 9 mm
	Abertura 12 mm		Abertura 12 mm
	Abertura 15 mm		Abertura 15 mm
	Abertura máxima		Abertura máxima
<i>Shear</i> 12.7 mm	Abertura mínima	<i>Shear</i> 28.53 mm	Abertura mínima
	Abertura 3 mm		Abertura 3 mm
	Abertura 6 mm		Abertura 6 mm
	Abertura 9 mm		Abertura 9 mm
	Abertura 12 mm		Abertura 12 mm
	Abertura 15 mm		Abertura 15 mm
	Abertura máxima		Abertura máxima



Na Figura 6.4 pode observar-se o alvo usado nos ensaios, quer para permitir focar a imagem, quer para avaliar a amplitude do *shear* entre ambos os braços do interferómetro.



Figura 6.4 – Alvo utilizado no ajuste do interferómetro

Na Figura 6.5 mostra-se um exemplo do *shear* medido com o alvo. Nesta figura é possível perceber o efeito do interferómetro na imagem que resulta da sobreposição de ambas as frentes de onda geradas. Nesta situação vê-se que o objeto aparece replicado, ou seja, a mesma imagem aparece duas vezes e desenquadrada. A distância de *shear* pode ser quantificada como a distância entre dois pontos iguais que aparecem desenquadrados. Por exemplo, nesta imagem o *shear* pode ser definido como a distância entre as mesmas arestas da banda negra do alvo. O valor de *shear* pode facilmente ser determinado com recurso a um programa de análise de imagem. A metodologia usada para determinar o valor do *shear* consiste em medir a largura real da banda preta, usando um paquímetro. Depois num programa de análise de imagem medir em pixéis a largura da banda preta e a largura de *shear*. Usando uma regra de três simples é possível conhecer o valor imposto ao *shear* entre os dois braços do interferómetro.

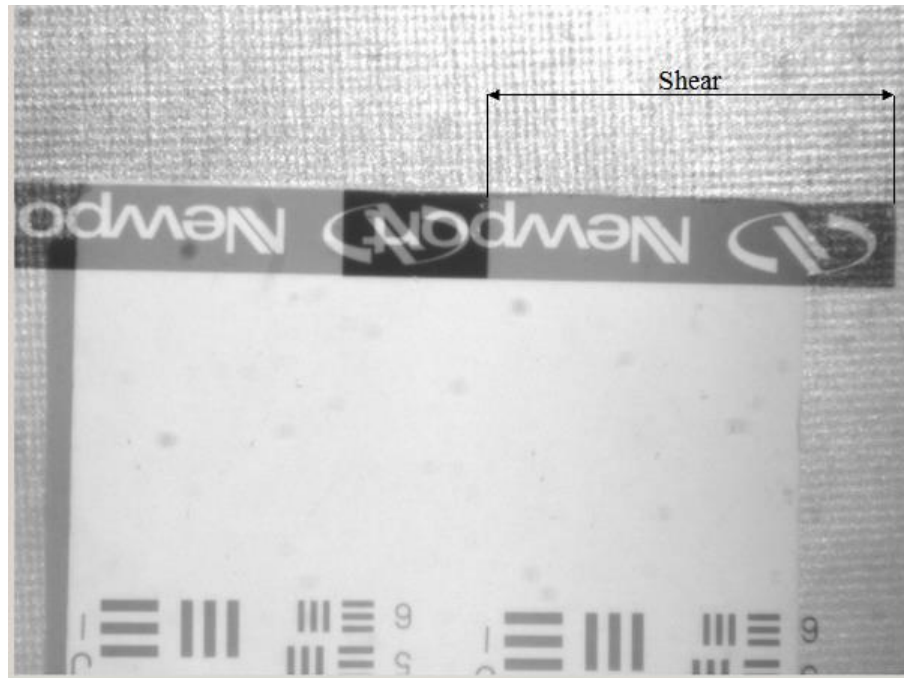


Figura 6.5 – Ajuste do *shear* com o alvo. *Shear* de 18 mm.

Depois de feito este estudo sistemático e obtidas as imagens para as diferentes combinações de parâmetros foi possível analisa-las pela qualidade das franjas tendo em conta o contraste, largura e quantidade.

O tipo de excitação escolhida para os ensaios foi a excitação térmica, pois esta é amplamente utilizada neste tipo de ensaios, sendo o seu uso vastamente mencionado e descrito na literatura. Esta técnica produz os resultados desejados sendo, também, conveniente do ponto de vista prático. Os ensaios foram feitos com recurso a uma lâmpada de halogéneo com potência de cerca de 500 W posicionada atrás da placa, em relação ao interferómetro, a cerca de 70 mm, como ilustrado na figura 6.3. O tempo de aquecimento utilizado foi 40 s. As imagens resultantes foram obtidas durante o arrefecimento da peça, ou seja, a peça é aquecida por 40 s, a lâmpada é desligada e imediatamente após este tempo é feita a imagem de referência à qual são subtraídas as imagens do arrefecimento da peça, depois de poucos segundos surgem franjas nos locais onde existem defeitos.

Nas Figura 6.6 a Figura 6.11 apresentam-se os resultados obtidos para todos os valores de *shear* utilizando um mesmo valor de diâmetro de abertura.





Figura 6.6 – *Shear* 2.07 mm, Abertura 6 mm. Placa

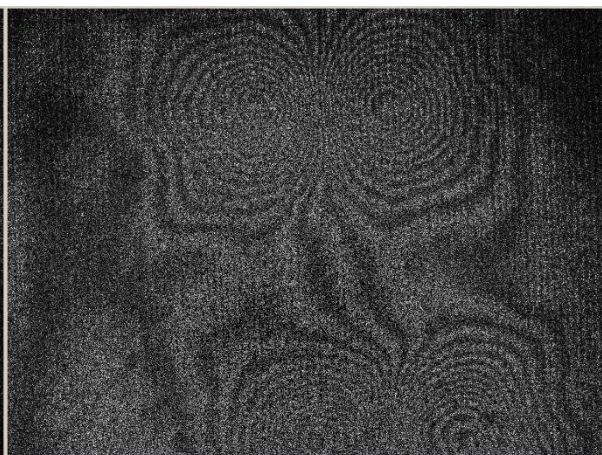


Figura 6.7 – *Shear* 7.36 mm, Abertura 6 mm. Placa

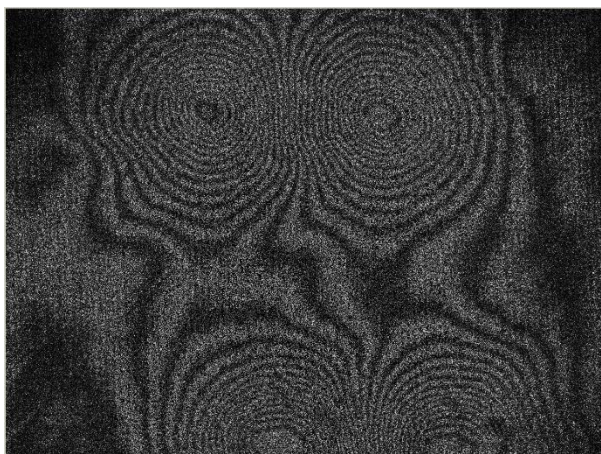


Figura 6.8 – *Shear* 12.66 mm, Abertura 6 mm. Placa

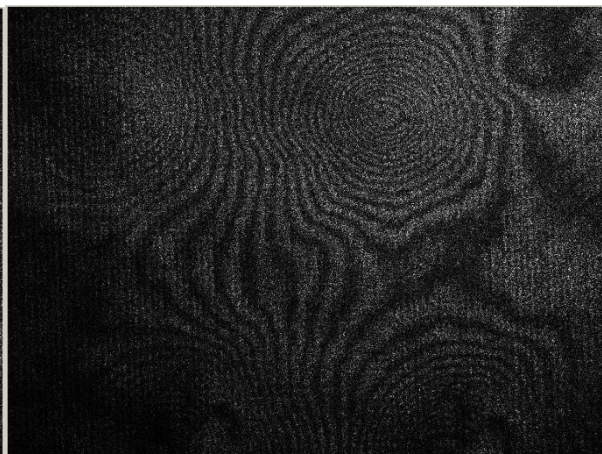


Figura 6.9 – *Shear* 17.96 mm, Abertura 6 mm. Placa



Figura 6.10 – *Shear* 23.26 mm, Abertura 6 mm. Placa

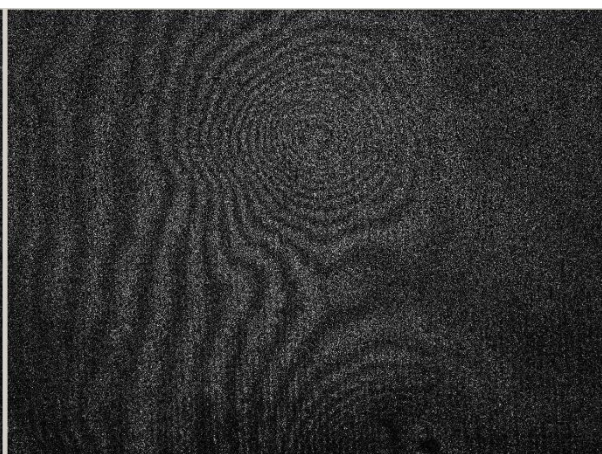


Figura 6.11 – *Shear* 28.54 mm, Abertura 6 mm. Placa

Verifica-se que para valores de abertura superiores a 9 mm não foi possível obter-se franjas. Analisando as imagens de *speckle* para estas aberturas é possível perceber que ocorreu saturação da imagem. A saturação ocorre quando a intensidade luminosa é muito elevada, isto explica porque ocorre saturação para valores de abertura mais altos, ou seja, quanto maior a abertura mais luz chega ao CCD. Era pertinente obter-se imagens com boa qualidade para valores de abertura superiores a 9 mm, para isso era necessário que não ocorresse saturação. Existiam duas formas de evitar a saturação: ou se alteravam as propriedades do CCD, diminuindo-se a sensibilidade luminosa; ou modificava-se a intensidade do feixe por controlo da potência do laser ou atenuação deste. A primeira opção foi excluída pois o laser em utilização não dispunha de controlo de potência, pelo que se optou por reduzir a intensidade do feixe. Isto pode ser conseguido com recurso a um filtro ótico colocado à saída do feixe, que permite ajustar a intensidade com que o feixe ilumina a peça.





Figura 6.12 – Speckle, *Shear* 12.66 mm, Abertura 12 mm. Placa

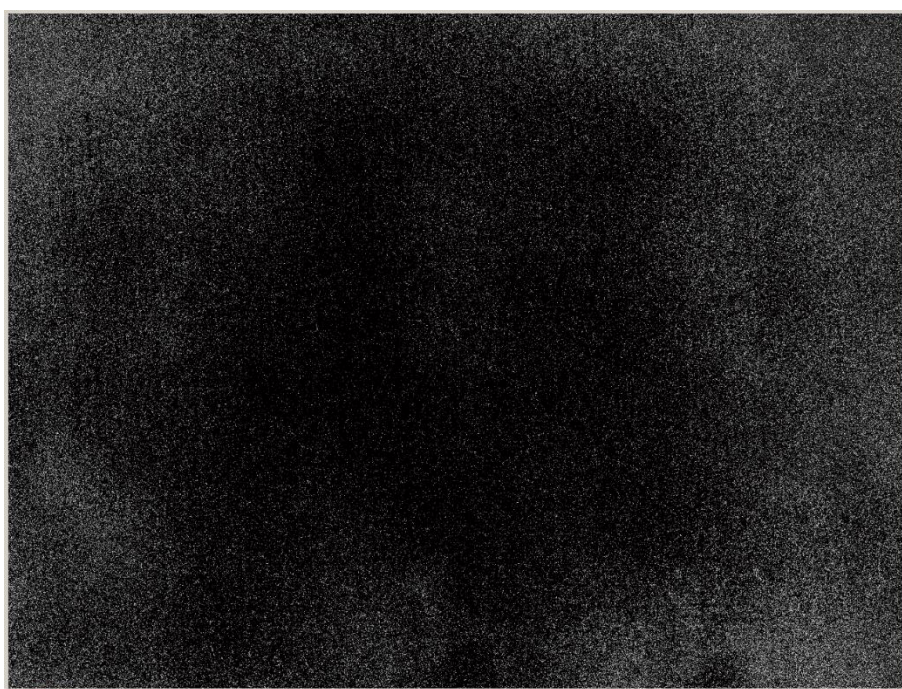


Figura 6.13 – *Shear* 12.66 mm, Abertura 12 mm. Placa

Na Figura 6.14 pode ver-se o filtro posicionado imediatamente em frente da lente. Este componente ótico tem várias bandas verticais que introduzem atenuação crescente., Fazendo o feixe passar por bandas diferentes é possível variar a intensidade do feixe à saída ou a razão entre o feixe refletido e transmitido.

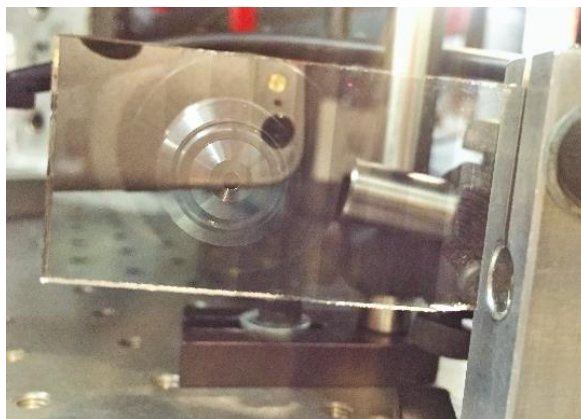


Figura 6.14 – Filtro para redução de intensidade do feixe de iluminação.

Após este estudo procedeu-se a uma nova montagem e fizeram-se novos ensaios para os valores de abertura superiores a 9 mm com recurso a um filtro para atenuar o feixe de iluminação evitando saturar o detetor de vídeo.

Apesar de ter sido utilizada a mesma montagem: método de fixação, método de aquecimento, distância do interferómetro à placa e da lâmpada de halogéneo, etc. verificou-se que os resultados obtidos diferiam da montagem inicial. Os melhores resultados foram registados para um tempo de aquecimento de 25 s e tomando como referência a peça no estado inicial, ou seja, é feita a imagem de referência e de seguida o aquecimento da placa durante 25 s. Após registar a primeira imagem bastam alguns segundos para se observar o aparecimento de franjas.

Nestes ensaios foi possível obter registos com qualidade para as aberturas superiores a 9 mm. O bom contraste das imagens permitiu detetar a presença do defeito. Observando a Figura 6.16 demonstra-se a melhoria da qualidade da imagem comparativamente com a Figura 6.13 e na Figura 6.15 é possível perceber-se o efeito do filtro na imagem de *speckle*, que quando comparada com a Figura 6.12, apresenta-se menos saturado. Deve referir-se que na figura 6.15 é perfeitamente visível um padrão de franjas paralelas orientadas segundo a vertical. Tais franjas resultam da interferência das duas ondas geradas no atenuador que provêm da reflexão na primeira e segunda, superfícies do atenuador. A alteração do ângulo de incidência do feixe permite remover estas franjas.



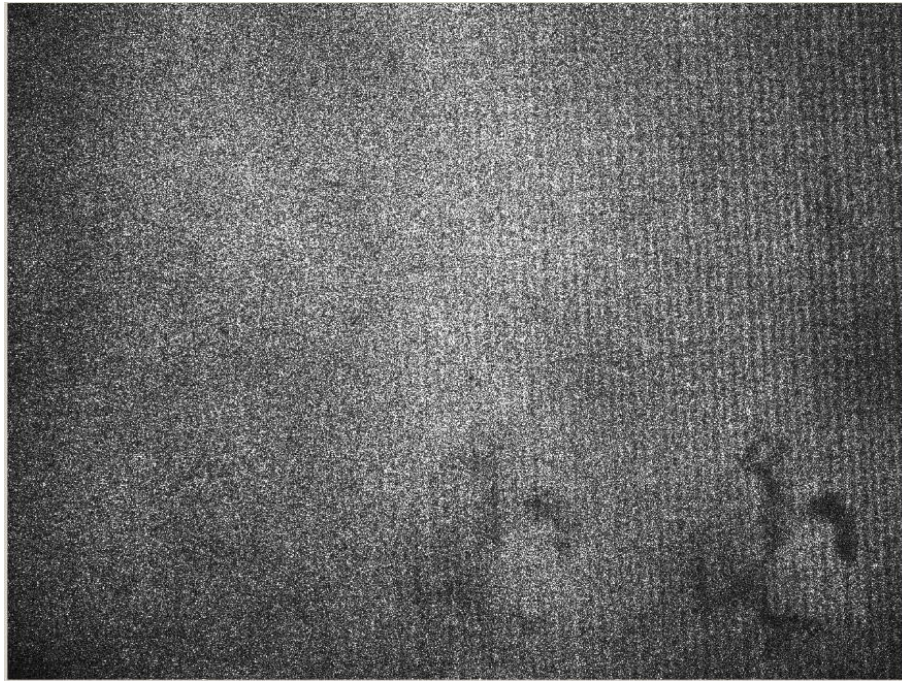


Figura 6.15 – Speckle, *Shear* 12.66 mm, Abertura 12 mm, Com filtro, Placa.

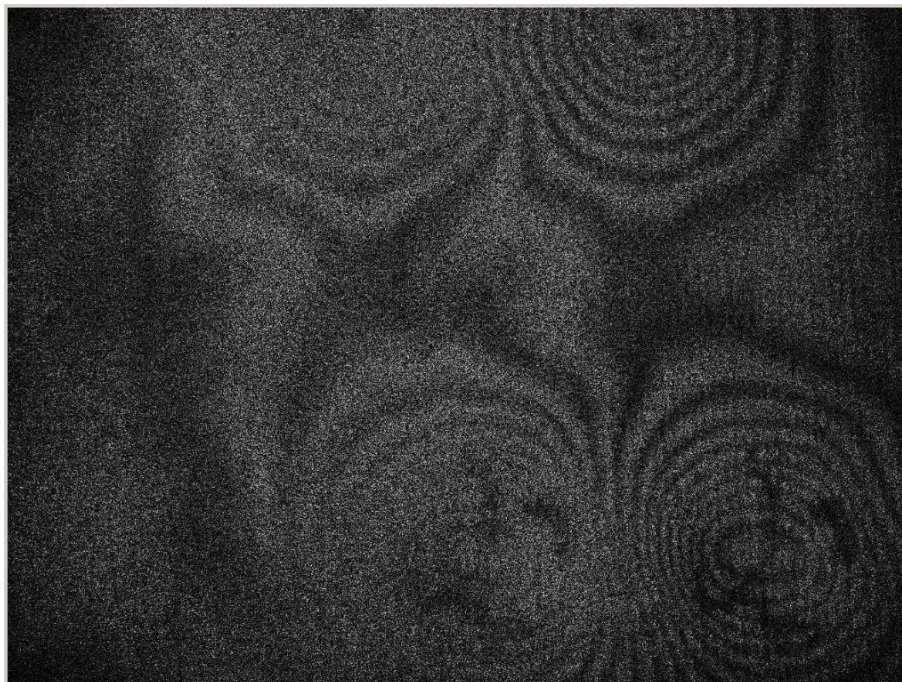


Figura 6.16 – *Shear* 12.66 mm, Abertura 12 mm, Com filtro, Placa

É, portanto, possível fazer-se um estudo comparativo da qualidade das imagens obtidas para diferentes valores de *shear* e de abertura. Resumindo aqui os resultados alcançados nestes testes pode dizer-se que o valor de *shear* não tem influência na qualidade das franjas, no entanto este valor deve ser ajustado de forma coincidir com o tamanho do defeito.

Como era de esperar se verifica que à medida que se varia o diâmetro da abertura do obturador o tamanho do grão varia. É importante estudar-se qual o tamanho do grão que origina imagens com a melhor qualidade e comparar os resultados práticos com o esperado do estudo teórico.

Com esta abertura o tamanho do *speckle* aproxima-se do tamanho do píxel da câmara e obtêm-se uma modulação máxima, isto é, o *speckle* é completamente resolvido.

O tamanho ideal do grão não é uma questão consensual. No entanto, tipicamente considera-se que ao tamanho ideal deve ser o que coincide com a dimensão do píxel do CCD. Segundo o fabricante a dimensão do píxel é  $4.4\text{ }\mu\text{m} \times 4.4\text{ }\mu\text{m}$ , por isso a dimensão ideal do grão será de  $4.4\text{ }\mu\text{m}$  diâmetro. Existem vários parâmetros que influenciam a dimensão do grão, no entanto, na prática a construção do interferómetro e a fonte de radiação disponível apenas permitem variar essa dimensão variando o diâmetro da abertura. Nas Figura 6.17 a Figura 6.23 pode observar-se a variação do tamanho do grão, para um *shear* de 12,66 mm, de acordo com a variação do diâmetro da abertura. Nas figuras percebe-se claramente a diminuição do tamanho do grão com o aumento do diâmetro da abertura.



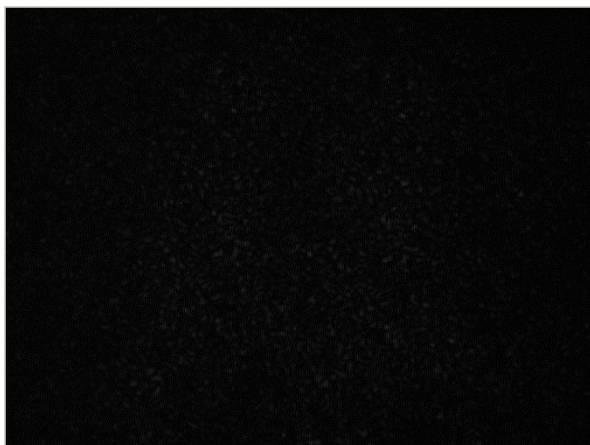


Figura 6.17 – Speckle. *Shear* 12.66 mm, Abertura mínima. Placa



Figura 6.18 – Speckle. *Shear* 12.66 mm, Abertura 3 mm. Placa

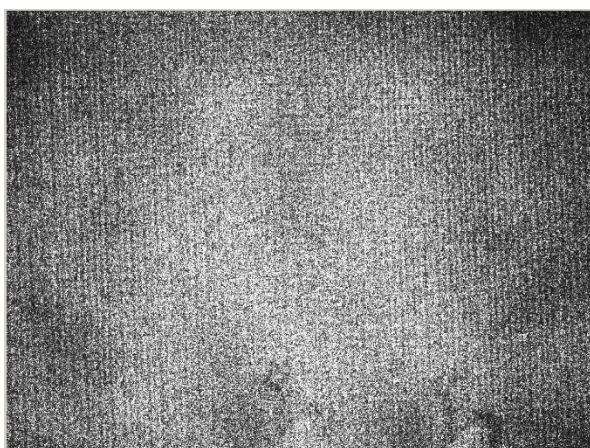


Figura 6.19 – Speckle. *Shear* 12.66 mm, Abertura 6 mm. Placa



Figura 6.20 – Speckle. *Shear* 12.66 mm, Abertura 9 mm. Placa



Figura 6.21 – Speckle. *Shear* 12.66 mm, Abertura 12 mm, Com filtro. Placa



Figura 6.22 – Speckle. *Shear* 12.66 mm, Abertura 15 mm, com filtro. Placa



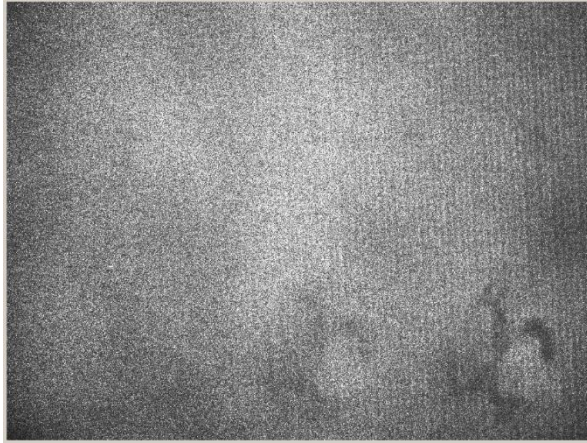


Figura 6.23 – Speckle. *Shear* 12.66 mm, Abertura máxima, com filtro. Placa

Para além da variação do tamanho do grão é possível observar que os níveis de intensidade da imagem aumentam até á abertura de 9 mm. Na prática constatou-se que o nível de saturação ideal se encontrava entre a abertura de 6 mm e 9 mm, por isso, para os valores de abertura superiores o filtro foi ajustado de forma a obter uma intensidade idêntica.

O seguinte conjunto de imagens, Figura 6.24 até Figura 6.30, mostram os resultados obtidos para um mesmo valor de *shear*, 12.66 mm, enquanto se faz variar o valor da abertura.

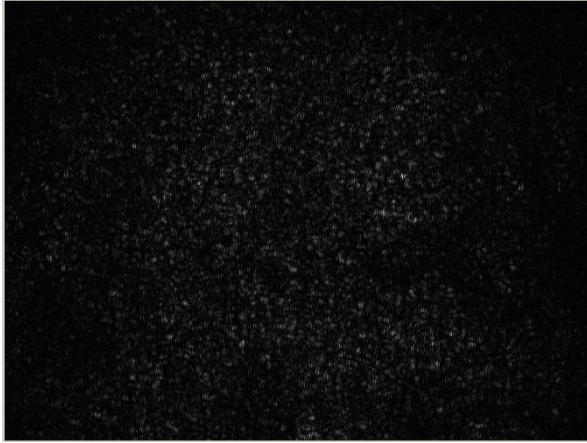


Figura 6.24 – *Shear* 12.66 mm, Abertura mínima, Placa.



Figura 6.25 – *Shear* 12.66 mm, Abertura 3 mm, Placa.

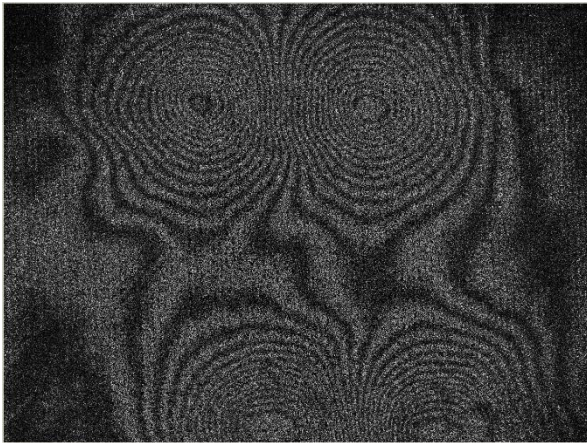


Figura 6.26 – *Shear* 12.66 mm, Abertura 6 mm, Placa.



Figura 6.27 – *Shear* 12.66 mm, Abertura 9 mm, Placa com filtro.



Figura 6.28 – *Shear* 12.66 mm, Abertura 12 mm, Placa com filtro.

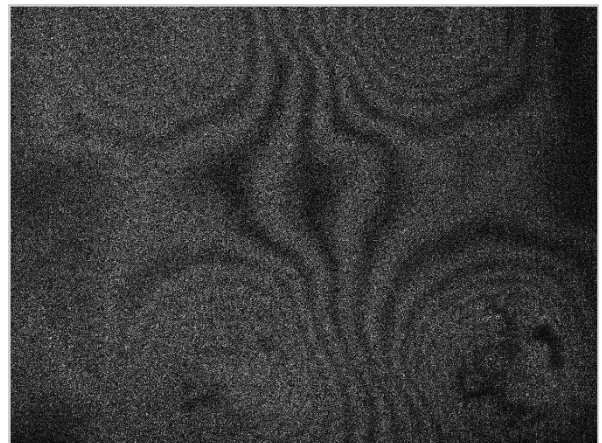


Figura 6.29 – *Shear* 12.66 mm, Abertura 15 mm, Placa com filtro.



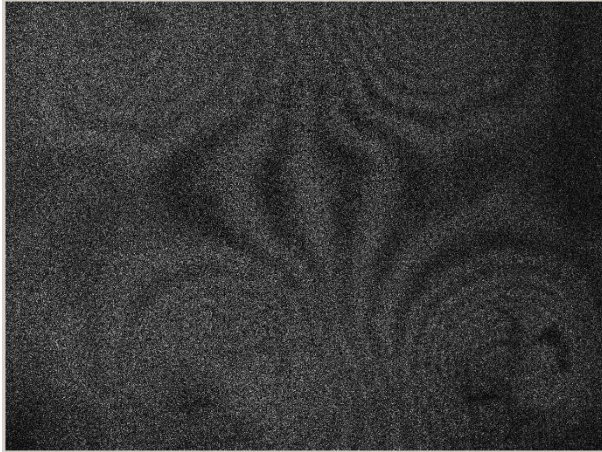


Figura 6.30 – *Shear* 12.66 mm, Abertura máxima,  
Placa com filtro.

Deste modo pode fazer-se um estudo comparativo do efeito da abertura na qualidade das franjas obtidas para um mesmo valor de *shear*. Os melhores resultados foram obtidos para os valores de abertura entre 6 mm e 12 mm. Contudo, foi possível obter franjas para as aberturas 3 mm até abertura máxima. Constatou-se que para aberturas mais elevadas existe perda de contraste nas franjas. Para aberturas mais baixas nota-se que a imagem fica escura e as franjas perdem visibilidade.

## 6.1 Ensaios de NDT numa peça construída na Caetano Aeronautic

Depois de feito este estudo e ajustados os parâmetros do interferómetro foi analisada uma outra peça construída em compósito de carbono com uma geometria um pouco mais complexa e defeitos de mais difícil deteção. Este componente apresenta espessura inferior à placa anteriormente estudada, cerca 2 mm, superfície longitudinal curva de raio elevado, superfície transversal ligeiramente curva e tem um reforço de nervura ao longo do comprimento. As características geométricas da peça fazem com que seja de mais difícil fixação na mesa ótica e torna mais difícil a deteção de possíveis defeitos.

Esta peça foi fornecida pela empresa Caetano Aeronautic, que fabrica componentes para a indústria aeronáutica, nomeadamente para a Boeing. A peça fornecida é um componente estrutural produzido para o avião militar A400M. Esta peça foi obtida e utilizada para a realização de um trabalho no âmbito da unidade curricular de mecânica experimental, pelo que foi analisada, no LOME, com recurso a duas técnicas de deteção de defeitos, *shearography* e termografia, sendo, por isso, possível comparar esses resultados com os resultados obtidos nos ensaios no âmbito desta tese.

Inicialmente a peça não apresentava defeitos interlaminares que pudessem ser estudados, por isso, no laboratório de ensaios tecnológicos (LET), a peça foi impactada numa máquina tipo *drop tower* originando quatro defeitos referentes a quatro energias de impacto diferentes, nomeadamente: 5 J, 10 J, 15 J e 20 J. Os ensaios realizados focaram-se apenas em dois defeitos, no de maior e no de menor energia de impacto. Detetando o defeito correspondente a uma menor energia de impacto é válido assumir-se que todos os outros defeitos seriam detetados.

Nas Figura 6.31 e Figura 6.32 mostra-se a peça ensaiada.

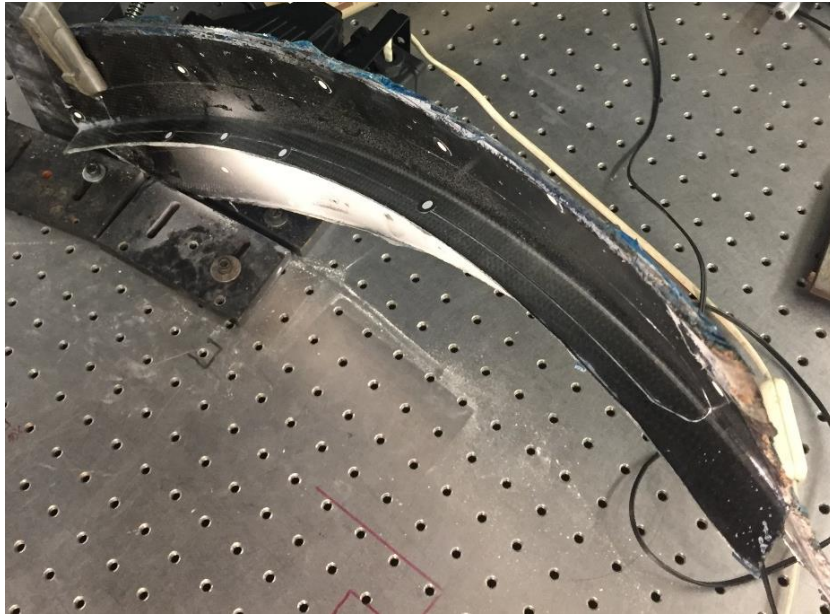


Figura 6.31 – Peça em material compósito, fixada na mesa anti vibrátil.



Figura 6.32 – Detalhe da peça da Figura 6.31 mostrando a nervura e a superfície ensaiada.

Os ensaios feitos neste componente tiveram a montagem semelhante aos ensaios anteriores. Contudo, devido à menor espessura da peça a potência da fonte térmica teve que ser reduzida para não provocar um aquecimento demasiado rápido. Para isso foi utilizada uma lâmpada de halogéneo de 250 W posicionada a cerca de 30 mm da peça. A peça foi, também, submetida a preparação da superfície com uma ligeira pintura com tinta branca removível. Os defeitos estão localizados na zona inferior da peça, relativamente à nervura. Na Figura 6.32 pode ver-se a localização dos defeitos marcados pelos círculos azuis. Também é possível ver-se o efeito do *spray* utilizado para a preparação da superfície. O pó branco que é visível à superfície é depois facilmente removido, não deixando qualquer marca na peça.

Na Figura 6.33 mostra-se a montagem usada para os ensaios da peça e na Figura 6.34 mostra-se um pormenor da montagem, onde é possível observar-se a fonte térmica e os grampos utilizados na fixação da peça.

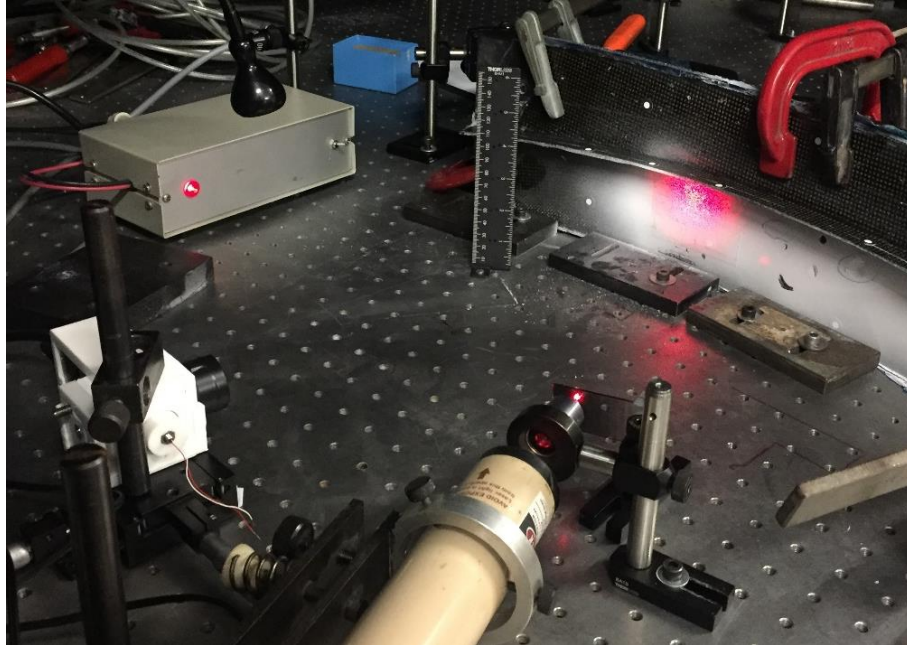


Figura 6.33 – Montagem para ensaio da peça com o protótipo desenvolvido visível no canto inferior esquerdo.

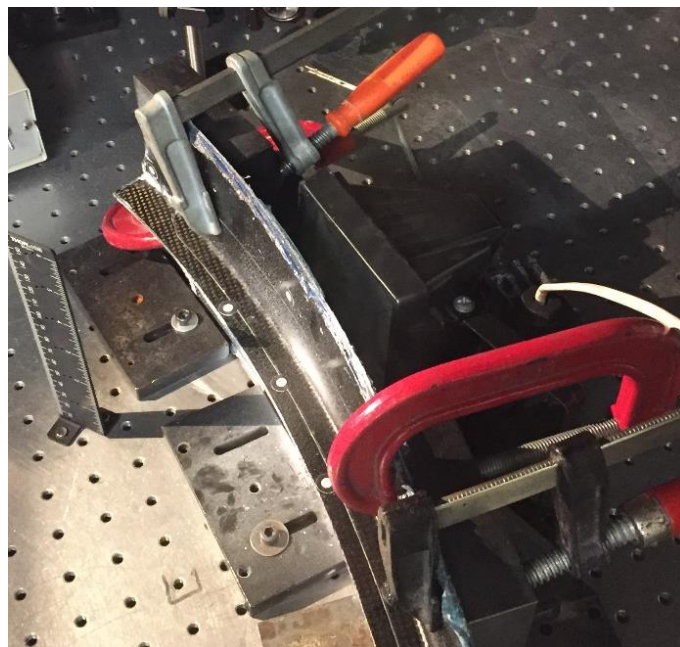


Figura 6.34 – Pormenor da montagem para ensaio da peça.

Também o método de obtenção de imagens foi diferente dos utilizados nos primeiros ensaios. Verificou-se que os melhores resultados eram obtidos durante o aquecimento ao invés de no



arrefecimento, em que era necessário mais tempo para a obtenção de imagens em que o defeito é perceptível. De referir que nessa situação as franjas são de mais fraca qualidade.

As imagens foram obtidas tomando como referência a peça a uma temperatura inferior e posteriormente subtraindo imagens do aquecimento da peça. O defeito torna-se perceptível após poucos segundos, aproximadamente 5 s de aquecimento. Ao invés dos ensaios à placa as imagens são obtidas em aquecimento, ou seja, com a lâmpada ligada. Após poucos segundos do surgimento de franjas na zona do defeito observa-se a homogeneização da imagem, perdendo-se a informação sobre o defeito. Nestas imagens vêem-se franjas que indiciam a presença do defeito e existem outras franjas que devem ser interpretadas como resultado das características próprias da peça.

Os parâmetros usados na realização dos ensaios foram escolhidos de acordo com os resultados obtidos nos ensaios iniciais. Justifica-se a escolha de uma abertura de 4 mm porque este é o valor máximo que produz imagens com a intensidade ideal sem recurso ao filtro e porque teoricamente dá origem a um tamanho de grão ligeiramente superior a dois píxeis, segundo a Eq. 4.41 A abertura de 11mm é o valor teoricamente gera tamanho de grão ideal, considerando que este deve ter a mesma dimensão do píxel, neste caso é já necessário o uso do filtro para controlo de saturação. Optou-se, também, pela realização de ensaios com valor de abertura máxima. Na Tabela 6.2 mostram-se os parâmetros de *shear* e diâmetro da abertura aplicados nos ensaios de cada defeito que foi analisado individualmente, ou seja, faz-se a montagem para o ensaio a um defeito e aplicam-se os parâmetros segundo a sequência descrita na Tabela 6.2 para esse defeito. Depois fez-se nova montagem para ensaio do outro defeito e aplicou-se a mesma sequência.

Tabela 6.2 – Parâmetros para inspeção da peça.

Parâmetros de abertura e <i>shear</i>		
<i>Shear</i> 2 mm	Abertura 4 mm	Defeito 4
	Abertura 11mm	
	Abertura máxima	
<i>Shear</i> 4 mm	Abertura 4 mm	Defeito 2
	Abertura 11mm	Defeito 4
	Abertura máxima	
<i>Shear</i> 9 mm	Abertura 4 mm	Defeito 2
	Abertura 11mm	Defeito 4
	Abertura máxima	
<i>Shear</i> 22 mm	Abertura 4 mm	Defeito 2
	Abertura 11mm	Defeito 4
	Abertura máxima	

Após a realização dos ensaios foi possível verificar a existência de ambos os defeitos para todos os parâmetros testados. É possível perceber-se com clareza que existe um defeito no componente na zona em este foi impactado. Observando em tempo real, à medida que a peça é

ternicamente solicitada, percebe-se que existem franjas que a percorrem e é possível detetar um comportamento local na região do defeito. Nas Figura 6.35 a Figura 6.42 mostram-se imagens dos dois defeitos analisados, 5 J e 20 J, obtidas para um *shear* de 9 mm e diâmetro de abertura de 11 mm, em diferentes instantes de tempo. Para cada defeito são apresentadas quatro imagens que pretendem ilustrar a propagação de franjas, que indiciam a presença do defeito. Os quatro instantes representam saltos temporais de cerca de 2 s, ou seja a imagem do instante 1 foi obtida 2 s após o início da solicitação, o instante 2 obtido 2 s após o instante 1 e assim sucessivamente.

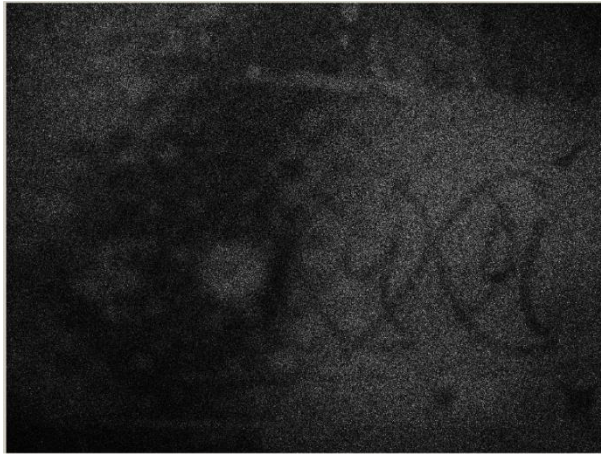


Figura 6.35 – Defeito 5 J. *Shear* 9 mm. Abertura 11 mm. Instante 1. Peça Caetano aeronáutica.

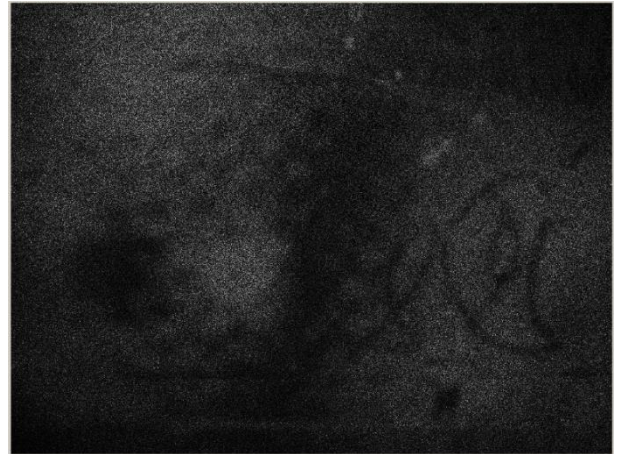


Figura 6.36 - Defeito 5 J. *Shear* 9 mm. Abertura 11 mm. Instante 2. Peça Caetano aeronáutica

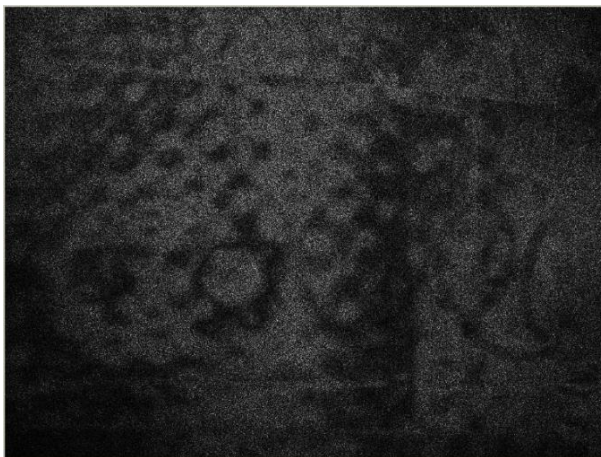


Figura 6.37 - Defeito 5 J. *Shear* 9 mm. Abertura 11 mm. Instante 3. Peça Caetano aeronáutica.

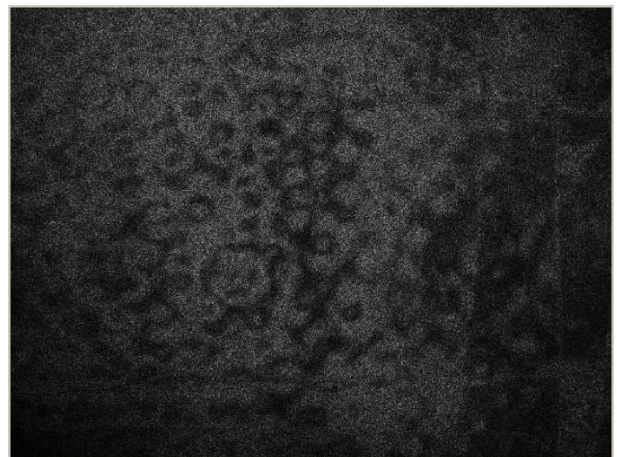


Figura 6.38 - Defeito 5 J. *Shear* 9 mm. Abertura 11 mm. Instante 4. Peça Caetano aeronáutica.





Figura 6.39 - Defeito 20 J. *Shear* 9 mm. Abertura 11 mm. Instante 1. Peça Caetano aeronáutica.

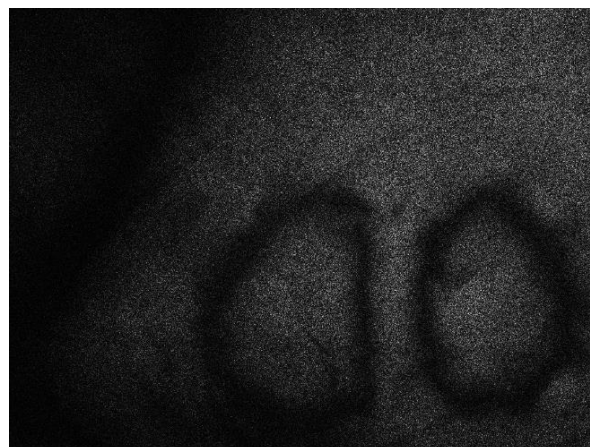


Figura 6.40 - Defeito 20 J. *Shear* 9 mm. Abertura 11 mm. Instante 2. Peça Caetano aeronáutica.

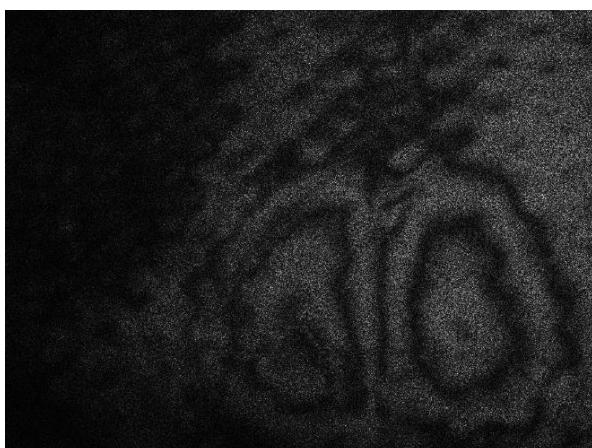


Figura 6.41 - Defeito 20 J. *Shear* 9 mm. Abertura 11 mm. Instante 3. Peça Caetano aeronáutica.

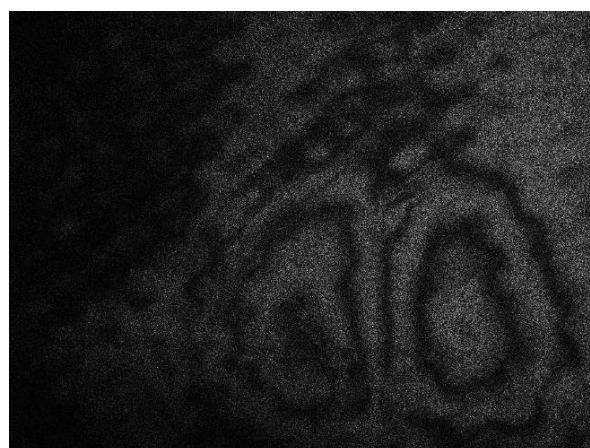


Figura 6.42 - Defeito 20 J. *Shear* 9 mm. Abertura 11 mm. Instante 4. Peça Caetano aeronáutica.

Comparando os dois conjuntos de imagens percebe-se, tal como é espectável, que a severidade do dano provocado pelo impacto de 20 J é maior que o impacto de 5 J. Isto pode ser percebido pela diferença do tamanho do defeito e pela densidade de franjas na zona do defeito, que são indicativo de um maior gradiente de deslocamentos.

É possível comparar estas imagens com imagens obtidas com recurso a outro aparelho de *shearography*, que existe no LOME, com o qual é possível analisar uma área consideravelmente superior. Embora o *software* de processamento de imagem seja idêntico, todos os componentes óticos e o sensor CCD tem melhores propriedades óticas. Este aparelho apresenta mais capacidade e é capaz de produzir imagens com boa qualidade, por isso é uma boa referência para comparação. Nas Figura 6.43 e Figura 6.44 apresentam-se alguns resultados obtidos com recurso a esse aparelho.

Os ensaios foram feitos com excitação térmica. As imagens obtidas são mapas de fase e não padrões de interferência. Estes mapas foram obtidos com a técnica de modulação temporal de fase com 4 imagens e salto de fase  $\pi/2$ . O programa usado faz, também, pós-processamento que filtra a imagem e remove as descontinuidades do cálculo de fase produzindo uma distribuição contínua desta grandeza.



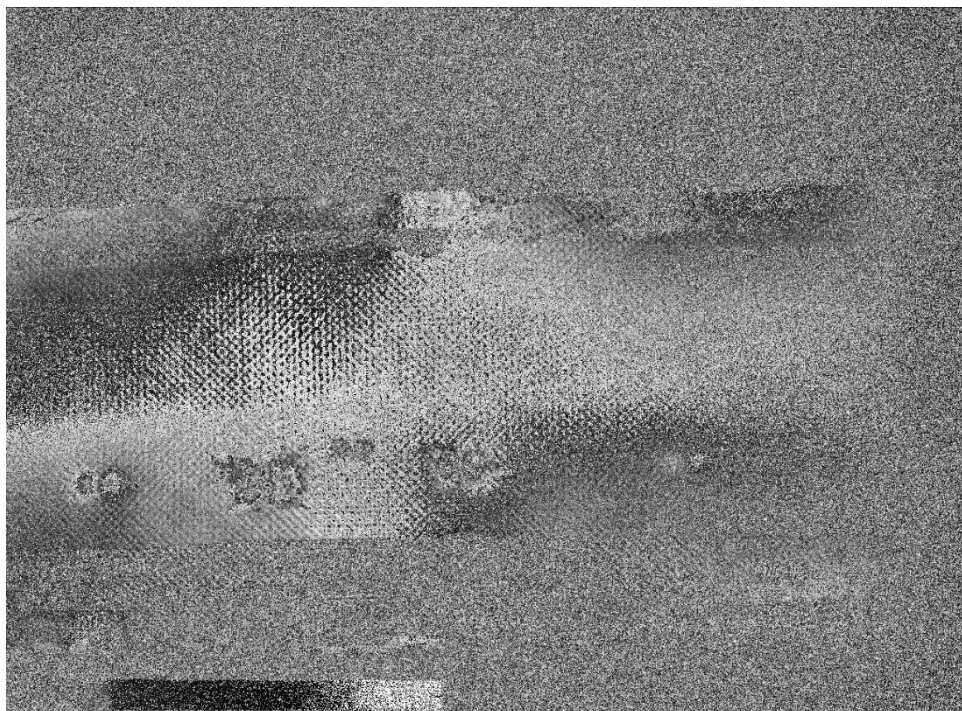


Figura 6.43 – Defeitos salto de fase.

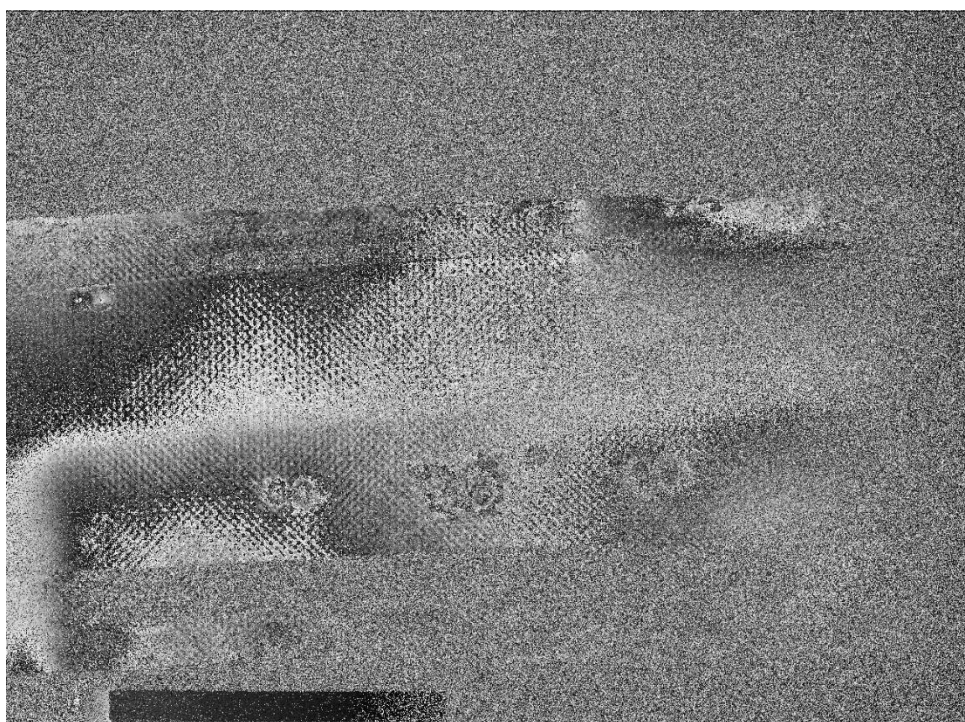


Figura 6.44 – Defeitos salto de fase.

Analisando as Figura 6.43 e Figura 6.44 nota-se a existência de quatro defeitos e de dois dos três furos que o componente tem.

Com base nos resultados obtidos com o interferômetro, que mostram claramente a presença e a severidade relativa dos defeitos, pode admitir-se que a técnica de modulação temporal de fase aplicada ao interferômetro resultaria em imagens semelhantes às mostradas nas Figura 6.43 e



Figura 6.44. Na Figura 6.45 mostram uma imagem de mapa de fase da análise da peça com os respectivos defeitos e furos destacados.

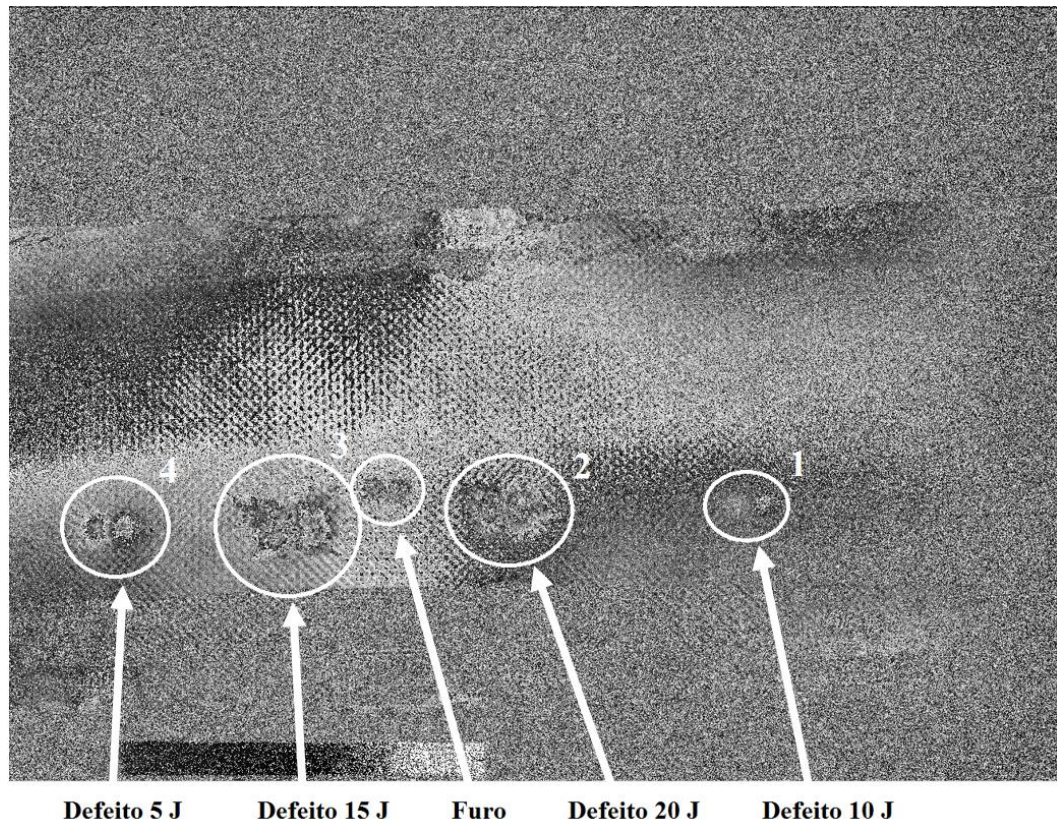


Figura 6.45 – Peça com defeitos destacados.

## 6.2 Considerações finais de capítulo

Usando apenas a subtração de dois padrões de interferência foi possível detetar a presença do dano nos defeitos estudados.

Comparando os padrões de franjas de cada defeito percebe-se a diferença da severidade do dano. No entanto, sem técnicas de processamento de imagem adequadamente calibradas não é possível quantificá-lo.

A calibração dos componentes não é simples e envolve alguma minúcia por parte do operador. A precaridade do interferómetro gera dificuldades de operação que resultam, por exemplo, na desfocagem de uma imagem em relação à outra. Seria possível melhorar esta característica com uma melhor fixação dos elementos. No entanto, do ponto de vista académico isso não se revelou uma necessidade para a obtenção de resultados.

Tempos de utilização longos provocam aquecimento excessivo da câmara. Isto pode provocar, por exemplo, uma diminuição da relação sinal/ruído ou em último caso danificar o sensor CCD. Poderia minimizar-se este problema, por exemplo, incorporando no projeto uma massa térmica e dissipador de calor.



## 7. Conclusões e trabalhos futuros

### 7.1 Conclusão

Nesta dissertação pretendia-se projetar e construir um sistema que usasse a técnica interferométrica de *shearography* para a deteção de defeitos em compósitos. O sistema deveria cumprir alguns requisitos importantes: ser fácil de operar; ser fácil de produzir; ser económico.

Inicialmente foi feito um levantamento do estado da arte na área da inspeção não destrutiva. Foram estudadas técnicas não interferométricas e técnicas interferométricas. Dentro das técnicas interferométricas foi aprofundado o estudo ao nível das capacidades atuais das técnicas, ao nível da medição de deslocamentos, gradientes de deslocamentos, tensões, etc. Estas técnicas podem ter sensibilidade para medir grandezas fora do plano ou no plano e uma combinação destes. É possível, por exemplo, com recurso a várias fontes luz ou sensores de imagem obter uma matriz com as várias componentes da grandeza medida. Descrevem-se também algumas capacidades das técnicas não só ao nível da medição estática como da medição dinâmica, onde podem ser estudados fenómenos vibratórios harmónicos ou transientes.

Para o projeto do sistema foi necessário selecionarem-se alguns componentes óticos, como espelhos, divisor de feixe, etc. Os componentes usados estavam já à disposição no LOME, no entanto, foi feita uma simulação de seleção de componentes, em que se fez um estudo considerando a qualidade dos elementos e simultaneamente o seu custo. Esta simulação permite ter-se uma noção realista do custo de produzir de origem um sistema deste tipo.

Após a seleção de componentes foi necessário recorrer a *software* de modelação 3D, SolidWorks®. Esta ferramenta foi essencial para a modelação dos componentes usados na estrutura do interferómetro, assim como o estudo das distâncias críticas a serem consideradas no projeto de um interferómetro. Após a modelação do interferómetro foi necessário gerar os ficheiros para fabrico aditivo recorrendo-se ao *software* kisslicer. Este *software* permite gerar um ficheiro de código que é depois reconhecido numa impressora 3D. Com o kisslicer é possível controlar inúmeros parâmetros importantes da impressão que afetam diretamente a qualidade das peças produzidas. A utilização da técnica de fabrico aditivo e a utilização de *software* próprio para este fim implicou estudo sobre o este assunto, pois garantir peças com boa qualidade é fundamental para o correto funcionamento do interferómetro.

Os elementos estruturais do interferómetro foram fabricados em material polimérico, PLA, através da utilização de uma impressora 3D. A escolha de material e de técnica de fabrico mostrou que é possível desenvolver aparelhos de interferometria para NDT com recurso a materiais e técnicas tradicionalmente não utilizadas para esse fim. Isso pode abrir caminho, por exemplo, à miniaturização de componentes, redução de custos e redução de peso do interferómetro, que nalgumas aplicações pode ser vantajoso. Também, com a flexibilidade oferecida pelo fabrico 3D, os engenheiros responsáveis por desenvolver estes sistemas podem facilmente explorar novas configurações e soluções dos seus interferómetros. Para além destas

possibilidades a utilização destas técnicas de fabrico pode possibilitar a introdução deste tema no plano de estudos dos cursos de engenharia.

Para a aplicação da técnica é necessário desenvolver *software* próprio. As possibilidades no desenvolvimento de *software* para a *shearography* são imensas: desde a aquisição de imagem, cálculo de interferência, cálculo da fase de interferência, desembrulhar do mapa de fase até ao pós-processamento de resultados. O *software* usado na aplicação deste interferómetro foi desenvolvido no LOME, no âmbito de um doutoramento que abordou uma aplicação semelhante, esse *software* teve que ser ajustado para o adequar ao sensor de imagem selecionado. Apesar de o interferómetro estar preparado para a técnica de modulação temporal de fase, o *software* não dispunha do programa adequado à utilização do salto de fase por isso não foi possível obter-se mapas de fase. No entanto, um padrão de interferência tem a capacidade de detetar anomalias que indiciam um defeito na peça. Uma elevada concentração de franjas de interferência indica a presença do defeito comparando várias imagens de defeitos diferentes é possível perceber-se qual o dano mais severo para a peça.

A solução foi validada ensaiando-se duas peças distintas com defeitos conhecidos previamente induzidos. Mostra-se que com recurso a técnicas básicas, para qualquer engenheiro mecânico, de modelação e fabrico é possível produzir um sistema baseado no interferómetro de Michelson com capacidade para a deteção de defeitos visualmente impercetíveis. A primeira peça usada para validar o projeto é uma simples placa retangular de fibra de carbono. Esta placa foi útil para a adaptação do autor à técnica, para a caracterização do interferómetro e para o estabelecimento dos parâmetros que permitem obter melhores resultados. Finda esta etapa procedeu-se ao ensaio de uma peça cedida por uma empresa do ramo aeronáutico. Esta segunda peça apresenta geometria mais complexa e características que tornam mais difícil a deteção de possíveis defeitos existentes. As dificuldades que surgem da segunda peça prendem-se com a sua pequena espessura e elevada razão entre a quantidade de fibra e de resina. Também a geometria complexa da peça torna a sua fixação mais laboriosa e complexa. Tudo isto faz com a peça seja mais suscetível a perturbações durante o ensaio, assim como torna a interpretação das imagens mais difícil. Não obstante estas dificuldades prova-se que um sistema razoavelmente económico, quando comparado com os sistemas disponíveis no mercado, e produzido por um estudante de engenharia é capaz de detetar defeitos numa peça produzida fora do âmbito laboratorial e desenhada especificamente para integrar a estrutura de um avião. O sistema provou a sua capacidade para detetar um defeito de impacto, de baixa energia, que não provocou alteração aparente na superfície da peça. Ou seja, foi possível detetar um defeito que muito dificilmente seria detetado por inspeção visual da superfície.

Os resultados obtidos foram comparados com os resultados do ensaio da mesma peça por um aparelho de *shearography*, de melhor qualidade, que acoplado com um *software* com mais capacidades produz imagens com boa qualidade. Essas imagens formam a base de comparação dos resultados obtidos neste trabalho. Para além disso, tendo em conta que as imagens obtidas são satisfatórias e indicam claramente a presença de dano, assim como a sua severidade relativa, e tendo sido obtidos mapas de fase, é possível antecipar os resultados expetáveis se fosse usada a técnica de modulação temporal de fase neste interferómetro.

Do decorrer deste trabalho percebe-se que a *shearography* é uma técnica bastante sensível, devido à sua elevada resolução, da ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação usada, e, por isso, a sua aplicação em ambiente industrial, estaleiro, etc. envolveria maior desenvolvimento do interferómetro, por exemplo, ao nível da rigidez, ou do método de acoplamento à estrutura ou peça a ensaiar, de forma a evitar problemas de descorrelação.

Em suma conclui-se que as técnicas interferométricas e em particular a *shearography* tem vastas aplicações quer a nível científico quer a nível industrial. Nota-se também que a sua

aplicação, por exemplo, ao nível da indústria aeroespacial e aeronáutica, entre outras, está normalizada quer nos Estados Unidos quer na Europa, assim como noutras partes do mundo. Apesar de a técnica estar já disponível desde os anos 80 e ter sido amplamente investigada o seu potencial ainda não está totalmente aproveitado. Com a evolução da ciência evoluem, também, os componentes que compõem um sistema deste tipo, nomeadamente os sensores de imagem. Estes tem vindo a ver desenvolvimentos das suas características, por exemplo, resolução ou rácio sinal/ruído, e também redução do preço. Desta forma percebe-se que o estudo destas técnicas é pertinente pelas possibilidades atuais que estas oferecem, assim como as possibilidades potenciais de desenvolvimento futuro.

## 7.2 Perspetiva de trabalhos futuros

Como já foi referido o interferómetro desenvolvido apresenta várias limitações. Essas debilidades poderiam ser colmatadas com desenvolvimento ou melhoramento em vários níveis do projeto deste sistema *shearography*: No desenvolvimento do *software*; No desenvolvimento do projeto do interferómetro e no desenvolvimento do sistema ótico de formação de imagem. Para além deste trabalho de melhoria do interferómetro este pode ver as suas capacidades aumentadas. Deixam-se aqui algumas considerações e sugestões de trabalhos a desenvolver.

Ao nível do projeto do interferómetro verificaram-se alguns problemas na focagem das imagens. Poderia ser feito trabalho de otimização do projeto do interferómetro, por exemplo, melhorando o encaixe e fixação entre os diferentes componentes.

Este sistema foi testado e validado em ambiente laboratorial. O próximo passo é a sua aplicação em ambiente industrial, todavia isso requer algum desenvolvimento a todos os níveis do projeto.

Para a aplicação de um sistema de *shearography* em ambiente industrial é necessário garantir a estabilidade da medição. Nesta situação é ideal uma solução que integre o interferómetro e a fonte de radiação.

É também necessário garantir a estabilidade do interferómetro relativamente à área de ensaio. Seria útil o desenvolvimento de um mecanismo de acoplamento do interferómetro e fonte de radiação a uma estrutura ou peça a ensaiar. Por exemplo, pode ser desenvolvida uma solução de garras a vácuo com ventosas. Este tipo de solução deve ser completamente rígida e garantir a estabilidade durante o ensaio.

Ao nível do projeto do interferómetro pode ser desenvolvida uma solução que incorpore elementos de liga metálica, designadamente alumínio, em simbiose com os elementos polimérico, desta forma confere-se maior rigidez e estabilidade ao interferómetro, sem, com isso, lhe aumentar o significativamente o peso ou custo.

Ao nível do *software* o trabalho mais pertinente a ser desenvolvido é o desenvolvimento de uma rotina que permita usar a técnica de modulação temporal de fase. Outras rotinas, com vista à obtenção do mapa de fase podem, também ser desenvolvidas.

Também ao nível do *software*, numa fase mais avançada, este poderia ser desenvolvido para a aplicação do interferómetro à análise dinâmica de estruturas.

Verifica-se que a área de ensaio é pequena quando comparada com a capacidade de outros sistemas de interferometria. Como foi já referido o sistema tem apenas uma lente a focar a imagem no CCD. Existe a possibilidade de adquirir no mercado sistemas óticos com distância focal fixa, no entanto verifica-se que, para as necessidades deste tipo de interferómetros, requerem-se sistemas óticos com distâncias focais não *standard*, fabricados por empresas especializadas em ótica. Estes sistemas óticos com as características necessárias podem custar

entre 500 até 1000€ ou mais, o que, obviamente encareceria muito este sistema. Poderia ser feito um estudo e projeto de um sistema deste tipo, cujo custo seria consideravelmente inferior. Contudo isso exige a amplos conhecimentos em ótica e teoria das lentes.



## Referências

- [1] M. Grédiac, "The use of full-field measurement methods in composite material characterization: interest and limitations," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, no. 7–8, pp. 751-761, 7// 2004.
- [2] U. D. o. Defense, *Composite materials handbook. Volume 2. Polymer matrix composites materials popertities.*, US department of defense ed. US department of defense, 1999.
- [3] H. Kaiser and V. M. Karbhari, "Quality and monitoring of structural rehabilitation measures. Part 2: Review and assessment of non-destructive testing (NDT) techniques," 2002.
- [4] A. Schmidt, "Experimental Investigations on Nondestructive Testing Methods for Defect Detection with Double-Pulse Electronic Speckle Pattern Interferometry," Universitätsbibliothek der Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, 2009.
- [5] Y. Y. Hung *et al.*, "Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 64, no. 5–6, pp. 73-112, 5/1/ 2009.
- [6] X. Maldague, "Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing," 2001.
- [7] D. M. Mittleman, R. H. Jacobsen, and M. C. Nuss, "T-ray imaging," *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, vol. 2, no. 3, pp. 679-692, 1996.
- [8] N. Karpowicz *et al.*, "Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications," *Applied Physics Letters*, vol. 86, no. 5, p. 054105, 2005.
- [9] R. F. Anastasi, E. I. Madaras, D. O. Thompson, and D. E. Chimenti, "Terahertz NDE for under paint corrosion detection and evaluation," in *AIP Conference Proceedings*, 2006, vol. 820, no. 1, pp. 515-522: AIP.
- [10] Y.-K. Zhu, G.-Y. Tian, R.-S. Lu, and H. Zhang, "A review of optical NDT technologies," *Sensors*, vol. 11, no. 8, pp. 7773-7798, 2011.
- [11] J. Beckmann *et al.*, "Imaging capability of terahertz and millimeter-wave instrumentations for NDT of polymer materials," 2006.
- [12] M. Reiten, L. Hess, and R. A. Cheville, "Nondestructive evaluation of ceramic materials using terahertz impulse ranging," in *Nondestructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics*, 2006, pp. 617905-617905-8: International Society for Optics and Photonics.

- [13] Y. Morita, A. Dobroiu, K. Kawase, and C. Otani, "Terahertz technique for detection of microleaks in the seal of flexible plastic packages," *Optical Engineering*, vol. 44, no. 1, pp. 019001-019001-6, 2005.
- [14] H. RICHTER, S. HICKMANN, V. TRAPPE, and U. EWERT, "Non-Destructive Testing of Glass-Fibre Reinforced Polymers using Terahertz Spectroscopy."
- [15] T. Löffler, B. Hils, and G. Roskosh, "Characterization of Surface Structures using THz Radar Techniques with Spatial Beam Filtering and out-of-Focus Detection," in *9th European Conference on NDT Berlin (Germany)*, September 2006.
- [16] S. Wietzke, C. Jördens, N. Krumbholz, B. Baudrit, M. Bastian, and M. Koch, "Terahertz imaging: a new non-destructive technique for the quality control of plastic weld joints," *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, vol. 2, 2007.
- [17] T. Hasiotis, E. Badogiannis, and N. G. Tsouvalis, "Application of ultrasonic C-scan techniques for tracing defects in laminated composite materials," *Strojniški vestnik- Journal of Mechanical Engineering*, vol. 57, no. 3, pp. 192-203, 2011.
- [18] I. Technology Plus. *Ultrasound C-Scan Testing*. Available: <http://www.tpindt.com/ndt-ultrasound-c-scan-testing.php>
- [19] J. Butters and J. Leendertz, "Speckle pattern and holographic techniques in engineering metrology," *Optics & laser technology*, vol. 3, no. 1, pp. 26-30, 1971.
- [20] A. Macovski, S. Ramsey, and L. Schaefer, "Time-lapse interferometry and contouring using television systems," *Applied Optics*, vol. 10, no. 12, pp. 2722-2727, 1971.
- [21] e. a. J. C. Dainty, J. C. Dainty, Ed. *Laser speckle and related phenomena*. Springer-Verlag, 1984.
- [22] T. Kreis, W.-V. Verlag, Ed. *"Handbook of holographic Interferometry - optical and digital methods"*. Weinheim, 2005.
- [23] J. Newman. (2009). *The Shearography Solution*. Available: <http://www.qualitymag.com/articles/89826-the-shearography-solution>
- [24] M. Y. Y. Hung, "SHEAROGRAPHY AND APPLICATIONS IN NONDESTRUCTIVE EVALUATION," ed: Citeseer, 2005.
- [25] *EUROPEAN STANDARD EN 4179:2009*, 2009.
- [26] L. t. Inc. (2006). *Laser Shearography Inspection of Helicopter Rotor Blades*. Available: <http://www.laserndt.com/technology/ndtapplications/helicopter.htm>
- [27] D. Findeis and J. Gryzagoridis, "Inspection of Aircraft Components with the aid of Portable Digital Shearography," *Proceedings COMADEM 1999*, pp. 409-415, 1999.
- [28] F. L. di Scalea, J. B. Spicer, and R. Green, "Electronic shearography with thermal loading for detecting debonds in thick polyurethane/steel panels for marine applications," *Research in nondestructive evaluation*, vol. 12, no. 1, pp. 43-52, 2000.
- [29] Y. Y. Hung and H. Ho, "Shearography: An optical measurement technique and applications," *Materials science and engineering: R: Reports*, vol. 49, no. 3, pp. 61-87, 2005.
- [30] Y. Y. Hung, "Applications of digital shearography for testing of composite structures," *Composites Part B: Engineering*, vol. 30, no. 7, pp. 765-773, 1999.

- [31] M. W. Vollen, E. Vikhagen, G. Wang, A. E. Jensen, and S. J. Haugland, "Application of shearography techniques for vibration characterization and damage detection in sandwich structures," DTIC Document 2005.
- [32] B. Lamboul, O. Giraudo, D. Osmont, D. E. Chimenti, and L. J. Bond, "Detection of disbonds in foam composite assemblies using flexural waves and shearography," in *AIP Conference Proceedings*, 2015, vol. 1650, no. 1, pp. 1155-1161: AIP.
- [33] O. Giraudo and A. Damas, "Acousto-shearographic method for detecting adherence anomalies," in *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, 2010, pp. 765020-765020-12: International Society for Optics and Photonics.
- [34] Y. Y. Hung, "Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing," *Optical Engineering*, vol. 21, no. 3, 1982.
- [35] S. Waldner and S. Brem, "Compact shearography system for the measurement of 3D deformation," in *International Conference on Optical Metrology*, 1999, pp. 141-148: International Society for Optics and Photonics.
- [36] R. M. Groves, "Development of shearography for surface strain measurement of non-planar objects," PhD Thesis, Centre for Photonics and Optical Engineering School of Mechanical Engineering, Cranfield University, Cranfield, 2001.
- [37] D. Francis, "Surface strain measurement using pulsed laser shearography with fibre-optic imaging bundles," 2008.
- [38] A. Anisimov, M. G. Serikova, and R. M. Groves, "Development of the 3D Shape Shearography Technique for Strain Inspection of Curved Objects," in *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, 2016, p. DTh3C. 4: Optical Society of America.
- [39] H. M. R. Lopes, "Desenvolvimento de técnicas interferométricas, contínuas e pulsadas, aplicadas à análise do dano em estruturas compósitas.," Tese de doutoramento em engenharia mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2007.
- [40] J. M. Monteiro, "MÉTODOS DE INTERFEROMETRIA PARA INSPECÇÃO NÃO DESTRUTIVA," Tese de doutoramento em engenharia mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012.
- [41] P. D. Eugene Hetcht, McGraw-Hill, Ed. *Theory and problems of optics*. 1975.
- [42] G. L. Cloud, M. S. University, Ed. *Optical methods of engineering analysis*. Cambridge university press, 1998.
- [43] K. J. G°asvik, *Optical Metrology*, Third Edition ed. John Wiley & Sons, Ltd, 1987.